

Fe- mineralization in the Chahpalang occurrence of Anarak (Central Iran)

Mehrdad Barati, Akram Ostadhosseini and Reza Alaii Baghrabad

Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

The Chahpalang iron occurrence is located 90 km northeast of Ardakan city in Yazd province and Central Iran structural zone. The rock units in the study area consist of meta- volcanics, recrystallized carbonates and schists. The ore body is hosted by meta- volcanics and carbonate rocks. Magnetite (two types), hematite (three types) are associated with minor amount of pyrite and secondary minerals including goethite, limonite as ore minerals. The orebody exposed as disseminated, veins and rare small lenses in the study area. Disseminated, massive, corrosion, brecciated, replacement, network are the textures of mineralization and the alteration halos are chloritization, epidotization and silicification. Total iron values vary between 28 to 91 wt% in the samples studied. The low values of Cr, V as well as Ni- Co diagram confirm hydrothermal origin of Chahpalang iron occurrence. The REE total values are between 10 and 110 ppm and distribution pattern diagram of these elements indicate the decreasing trend from LREEs to HREEs, pointing to the fractionation of these elements in the hydrothermal process. Negative Ce and positive Eu anomalies and the REE calculated ratios demonstrate the similarity of Chahpalang iron index with hydrothermal deposits.

Key words: Fe mineralization, hydrothermal, Chahpalang, Anarak

* barati@basu.ac.ir

بررسی چگونگی کانه‌زایی آهن در رخداد چاه‌پلنگ انارک (ایران مرکزی)

مهرداد براتی*، اکرم استادحسینی و رضا اعلایی‌بقرآباد

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

اندیس آهن چاه‌پلنگ در ۹۰ کیلومتری شمال‌خاوری شهرستان اردکان در استان یزد و پهنه ساختمانی ایران مرکزی جای دارد. سنگ‌های متاولکانیک، کربنات‌های با تبلور دوباره و شیبست از واحدهای سنگی منطقه هستند. سنگ‌های متاولکانیکی و کربناته میزبان اصلی ماده معدنی اند. مگنتیت (دو نسل) و هماتیت (سه نسل) همراه مقدار کمی پیریت و کانی‌های ثانویه گوتیت و لیمونیت ماده معدنی را می‌سازند. ذخیره به‌صورت پراکنده، رگه‌ای و گاه عدسی‌های کوچک در منطقه رخنمون دارد. بافت‌ها شامل پراکنده، توده‌ای، خوردگی، برشی، جانیشینی و شبکه‌ای و هاله‌های دگرسانی شامل کلریتی شدن، اپیدوتی شدن و سیلیسی شدن هستند. مقدار آهن کل در نمونه‌های کانسنگی اندازه‌گیری شده از ۲۸ تا ۹۱ درصدوزنی تغییر می‌کند. کم‌بودن مقدار عنصرهای Cr و V و نمودار دوتایی Co-Ni خاستگاه محلول‌های گرمایی را برای کانسنگ آهن چاه‌پلنگ نشان می‌دهند. مقدار REE در نمونه‌ها برابر با ۱۰ تا ۱۱۰ ppm است. نمودار الگوی پراکندگی این عنصرها روند کاهشی از LREE به HREE نشان می‌دهد. این روند پیامد تفکیک این دوگروه در پی فرایندهای گرمایی است. آنومالی منفی Ce و مثبت Eu، و نسبت‌های REE به‌دست‌آمده نیز تشابه کانسنگ آهن چاه‌پلنگ با کانسارهای گرمایی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی آهن، گرمایی، چاه‌پلنگ، انارک

مقدمه

al., 2011; Atapour and Aftabi, 2017, 2019; Heidarian et al., 2017; Rajabzadeh and Rasti, 2017; Sepidbar et al., 2017).

ناحیه انارک، با دارابودن مناطق با کانه‌زایی مس، سرب، روی، طلا، آنتیموان، آرسنیک و آهن، از مناطق فلزایی ارزشمند ایران به‌شمار می‌رود (Ghorbani, 2002). کانی‌زایی آهن در منطقه

کانسارهای رسوبی و آتشفشانی- رسوبی، ذخایر ماگمایی مرتبط با سنگ‌های آذرین اسیدی تا حد واسط، لاریت‌ها و ذخایر گرمایی آهن، چهار گروه اصلی ذخایر آهن به‌شمار می‌روند که تیپ‌های مختلف آن در بخش گسترده‌ای از ایران یافت می‌شود (Bonyadi et

* barati@basu.ac.ir

Copyright©2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

محدوده کانسارچاه پلنگ بیشتر شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس‌های گوناگون، بررسی‌های عیارسنجی و کانی‌شناسی بوده‌اند (Jahangiri and Mansuri, 2007; Technoexport, 1982). از آنجایی که فلز آهن از ضروری‌ترین فلزهایی است که بشر به آن نیاز دارد، در این پژوهش، برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی، چگونگی کانه‌زایی اندوخته آهن چاه پلنگ بررسی می‌شود. یافته‌های این بررسی کمک شایانی به شناسایی، اکتشاف و شناخت خاستگاه اندوخته‌های جدید آهن در پهنه ایران مرکزی و دیگر پهنه‌های ساختاری ایران می‌کنند.

روش انجام پژوهش

در این پژوهش تلاش می‌شود با بررسی‌های میدانی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب، الگویی برای چگونگی کانه‌زایی رخداد آهن چاه پلنگ پیشنهاد شود. در بررسی‌های صحرائی، شمار ۸۰ نمونه سنگی برای بررسی سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری برداشت شد و از این نمونه‌ها، شمار ۲۵ مقطع نازک و ۳۰ بلوک صیقلی و ۳۰ مقطع نازک-صیقلی ساخته شدند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی با میکروسکوپ دو منظوره زایس در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا انجام شدند. برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی از کانسنگ آهن چاه پلنگ، نخست ۱۰ نمونه برگزیده و برای تجزیه ICP-MS (جدول ۱) به شرکت مطالعات مواد معدنی زرآرما فرستاده و نمونه‌ها به روش چهار اسید آماده‌سازی و ترکیب آنها اندازه‌گیری شدند. تجزیه‌های XRF از ۴۰ نمونه کانسنگ (جدول ۲) نیز در شرکت زرآرما انجام شد.

انارک به سه صورت گرمایی (کوارتز، هماتیت و به مقدار کمتر رگه‌های سیدریتی)، آتشفشان‌زاد و اسکارن دیده شده است (Sepehrirad, 2000; Karegaran Bafghi, 2001; Ghorbani, 2002; Behzadi, 2006; Rajabzadeh et al., 2014; Boomeri, 2013; Afzali et al., 2017). کانسارهای گرمایی آهن به شکل رگه‌ای و یا استوک‌ورک، از طریق فعالیت سیال گرمایی در ژرفای بسیار متفاوت، از محیط‌های سطحی تا بسیار ژرف پدید می‌آید. مگنتیت یا هماتیت ماده معدنی اصلی در این کانسارهاست (Guilbert and Park, 1997).

کانسنگ آهن چاه پلنگ در ۶۰ کیلومتری جنوب‌خاوری انارک و ۹۰ کیلومتری شمال‌خاوری اردکان، در محدوده‌ای میان طول‌های جغرافیایی خاوری $54^{\circ}18'10''$ تا $54^{\circ}20'30''$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $33^{\circ}06'00''$ تا $33^{\circ}06'30''$ جای دارد. این کانسنگ دربردارنده مگنتیت و هماتیت است و همراه مقدار کمی گوتیت، به صورت پراکنده در سنگ میزبان و گاه عدسی‌های کوچک در منطقه رخمنون دارد. برپایه بررسی‌های انجام‌شده، کانسنگ آهن چاه پلنگ در سنگ‌های متابازیت (متاولکانیک‌ها) جای گرفته است. متابازیت‌های چاه پلنگ در رخساره‌های آمفیبولیت دگرگون شده، سپس این سنگ‌ها دچار دگرگونی پس‌رونده در رخساره شیست سبز شده‌اند (Bayat and Torabi, 2012). بررسی‌های Bagheri (۲۰۰۷) نشان می‌دهند در پالئوزویک، این منطقه در مرز جنوبی پالئوتتیس جای داشته است و ویژگی‌های ساختاری منطقه در ارتباط با همین رویدادهای بزرگ مقیاس هستند. کانسارهای تنگستن (مس-طلا) چاه پلنگ جنوبی در منطقه چاه پلنگ دیده می‌شوند (Ghaderi et al., 2015). کارهای انجام‌شده در

جدول ۱- داده‌های تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسنگ چاه‌پلنگ به روش ICP-MS (برپایه ppm و درصد وزنی)، به همراه نسبت‌های به‌دست‌آمده برای عنصرهای REE

Sample No.	Ch- 2- 1	2Ch- 14	Ch- 3	Ch- 4B	Ch- 8A	Ch- 8E	Ch- 8F	Ch- 8G	Ch- 8H	Ch- 10A
Ag	0.2	0.3	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Al	100	6760	6610	1555	2104	1525	2794	1404	3079	3149
As	68.4	37.8	5	5.9	3.2	0.1	1.6	0.1	2.7	0.9
Ba	1293	50	109	308	7	7	5	5	14	74
Be	0.3	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.6
Bi	2.2	2.3	0.9	0.4	0.1	0.4	0.2	0.5	0.1	0.1
Ca	100000	100000	9418	94229	86886	96119	67508	100000	100000	42714
Cd	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.12
Ce	40	26	11	9	6	14	4	15	10	11
Co	44.7	34.9	31.9	12	3.3	4.8	3.7	7.2	2.8	9.8
Cr	37	72	46	15	16	13	16	18	14	19
Cs	0.9	1.1	1.3	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
Cu	217	229	85	57	7	7	5	29	<1	6
Dy	3.35	2.18	1.04	1.3	0.83	1.39	0.43	1.32	1.46	1.3
Er	2.05	1.41	0.83	0.97	0.5	1.14	0.05	0.93	1.2	1.21
Eu	3.24	1.73	0.36	0.89	0.33	0.63	0.16	0.61	0.63	0.44
Fe	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%
Gd	6.36	3.81	1.51	1.6	1.1	1.92	0.62	1.92	1.8	1.62
Hf	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
In	0.5	0.61	0.71	0.94	0.5	0.93	0.5	0.71	0.64	0.5
K	217	344	945	935	481	286	807	330	927	338
La	20	14	10	5	4	9	2	10	6	9
Li	3	11	5	5	2	2	2	2	6	5
Lu	0.12	0.11	0.1	0.1	0.1	0.11	0.1	0.1	0.11	0.12
Mg	20000	20000	4823	13732	6925	18105	3052	11255	19900	14994
Mn	24980	33987	84528	44095	24178	31173	13295	28500	38707	39108
Mo	10.8	21.7	22.6	64.3	3.3	4.1	1.2	3.5	6.5	14.3
Na	8450	5869	5712	6190	3465	3768	1436	3953	5784	3534
Nb	1.4	1	1.3	1	1	1	1	1	1	1
Nd	23.9	14.5	5.4	5.6	4	7.6	2	7.9	6	5.8
Ni	36	29	13	11	8	9	8	10	8	11
P	169	149	127	134	160	162	141	144	159	589
Pb	13	12	3	8	5	5	4	5	9	6
Pr	4.8	3.08	1.46	1.35	1.08	1.83	0.73	1.87	1.43	1.45
Rb	3	3	5	3	3	2	3	2	4	3
S	899	584	1490	549	401	553	291	558	705	755
Sb	7	2.5	0.8	1.2	1.4	0.7	2	0.5	0.5	1
Sc	1.1	1.2	1.1	0.5	0.8	0.6	0.5	0.6	0.6	1.9
Se	0.73	0.5	1.31	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sm	5.41	2.95	1.04	1.34	0.87	1.44	0.51	1.42	1.24	1.15
Sn	0.4	0.4	0.5	0.9	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.6
Sr	313	273	625	474	214	271	77	198	301	230
Ta	0.1	0.1	0.13	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Tb	0.66	0.42	0.2	0.25	0.17	0.25	0.11	0.24	0.26	0.22
Te	0.87	0.15	0.1	0.1	0.1	0.16	0.1	0.1	0.1	0.1
Th	0.63	1.18	0.88	0.38	0.4	0.44	0.32	0.44	0.36	0.55
Ti	299	236	363	33	43	15	22	16	10	19
Tl	0.1	0.2	0.22	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18
Tm	0.18	0.16	0.13	0.14	0.12	0.15	0.1	0.14	0.17	0.16
U	4.5	4.9	7.4	7.5	1.6	1.9	1.5	1.63	2.1	1.6
V	18	35	32	19	26	18	20	16	15	35
W	0.5	0.7	0.8	1.9	3.1	1.2	3.7	1.4	0.5	0.6
Y	12.1	8.1	5.1	5.1	2.5	5.5	0.8	4.7	6.1	6.6
Yb	0.6	0.5	0.3	0.4	0.3	0.5	0.1	0.4	0.5	0.5
Zn	41	86	583	175	93	111	63	78	108	968
Zr	11	13	20	12	15	12	14	11	8	21
∑LREE	97.35	62.26	29.26	23.18	16.28	34.5	9.4	36.8	25.3	28.84
∑HREE	13.23	8.59	4.11	4.76	3.12	5.46	1.51	5.05	5.5	5.13
∑REE	110.67	70.85	33.37	27.94	19.4	39.69	10.91	41.85	30.8	33.97
δ Eu	1.69	1.58	0.88	1.86	1.03	1.16	0.87	1.13	1.29	0.99
(La/Yb) _n	22.47	18.88	22.47	8.43	8.99	12.14	13.48	16.85	8.09	12.14
(Gd/Yb) _n	8.56	6.15	4.05	3.24	2.95	3.1	4.98	3.88	2.91	2.62
(La/Sm) _n	2.33	2.99	6.05	2.35	2.85	3.93	2.47	4.43	3.04	4.92
(Gd/Lu) _n	6.58	4.3	1.87	1.99	1.37	2.17	0.77	2.38	2.03	1.68
(Pr/Yb) _n	13.71	10.56	8.31	5.8	6.15	6.28	12.46	8.03	4.9	4.97
δ Ce	0.95	0.92	0.67	0.81	0.67	0.8	0.77	0.81	0.79	0.71

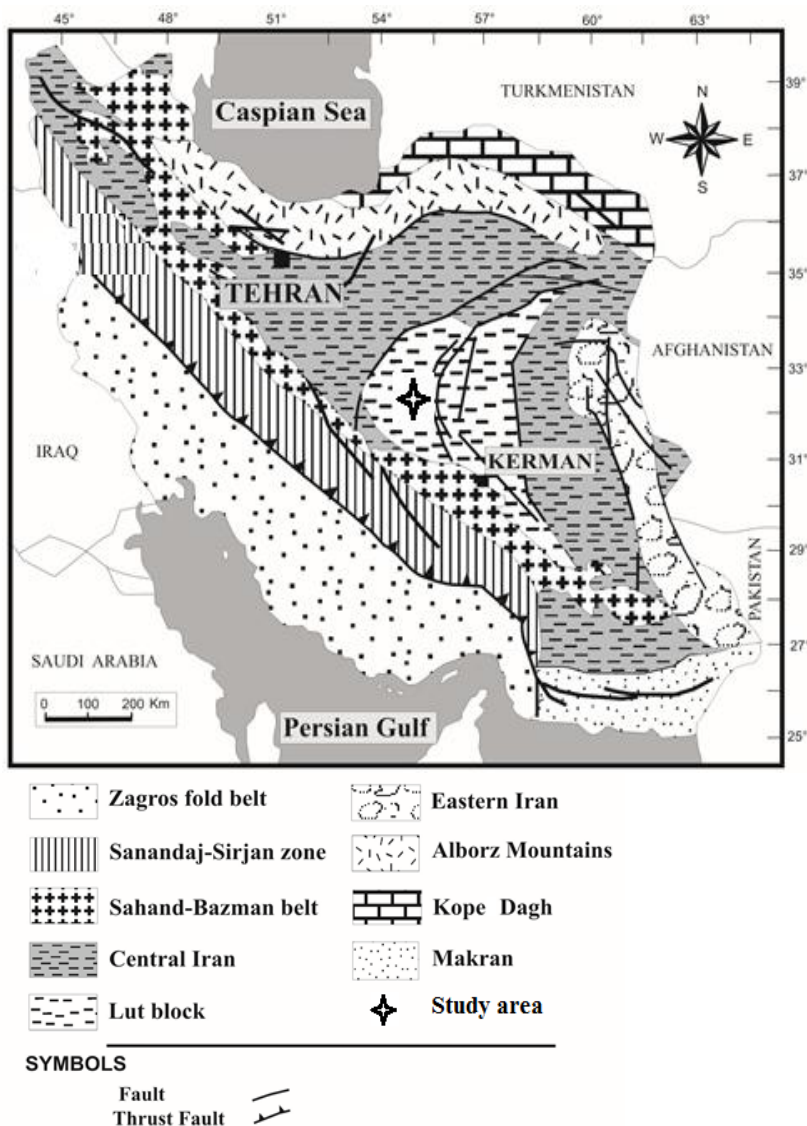
جدول ۲- داده‌های تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسنگ چاه‌پلنگ به روش XRF (بر پایه درصدوزنی)

Sample No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	S	L.O.I
Ch- 151	19.26	0.55	45.32	7.53	14.09	0.02	0.01	3.75	0.052	3.54	0.602	0.030	12.56
Ch- 152	14.59	3.07	56.28	9.69	8.62	0.01	0.01	5.23	2.34	1.34	0.723	0.038	7.48
Ch- 153	10.57	4.74	56.34	8.79	10.59	0.15	0.09	3.30	0.768	2.21	0.474	0.060	10.21
Ch- 154	19.91	2.79	58.23	8.07	4.25	0.01	0.06	4.45	0.315	4.53	0.404	0.053	4.56
Ch- 155	10.42	1.41	33.23	3.95	25.78	0.02	0.36	1.16	0.172	2.31	0.108	0.285	24.33
Ch- 156	24.64	1.26	63.91	5.58	1.85	0.38	0.02	2.60	0.094	1.95	0.364	0.340	2.22
Ch- 157	1.31	3.93	24.11	7.32	33.45	0.37	0.46	2.48	0.344	3.44	0.286	0.083	29.30
Ch- 158	22.02	2.47	57.50	13.52	6.74	0.03	0.06	1.01	0.433	1.67	0.432	0.038	7.41
Ch- 159	25.70	1.37	57.89	7.34	2.72	0.22	0.03	4.00	0.185	3.85	0.505	0.080	3.18
Ch- 160	4.90	7.05	34.23	4.32	22.36	0.01	2.16	1.82	3.444	3.33	0.478	0.150	19.68
Ch- 161	15.05	1.26	60.34	15.72	6.45	0.14	0.01	3.02	0.048	7.43	0.023	0.013	6.17
Ch- 162	26.73	0.77	53.92	2.11	2.97	0.06	0.01	3.29	0.056	8.34	0.345	0.028	3.31
Ch- 163	6.69	2.24	60.47	1.61	14.55	0.01	0.06	2.16	0.152	0.74	0.096	0.200	12.77
Ch- 164	20.54	2.13	59.23	1.80	5.44	0.02	0.03	3.87	0.128	2.31	0.387	0.122	5.36
Ch- 165	9.04	1.30	69.45	5.19	6.23	0.11	0.01	3.57	0.156	3.45	0.511	0.455	5.67
Ch- 166	4.76	0.04	77.38	14.27	6.34	0.17	0.13	2.27	0.372	2.92	0.034	0.059	5.34
Ch- 167	3.18	0.43	64.25	4.69	10.45	0.03	0.04	3.54	0.202	7.34	0.724	0.059	9.25
Ch- 168	5.22	0.23	73.29	10.47	1.12	0.01	0.06	12.16	2.460	3.83	0.690	0.007	0.89
Ch- 169	4.71	2.07	65.47	0.93	6.03	0.03	0.16	5.38	0.282	10.15	0.317	0.042	4.95
Ch- 170	3.41	0.04	75.45	3.24	5.38	0.01	0.05	5.09	0.236	5.67	0.040	0.022	4.43
Ch- 171	14.95	2.15	60.72	5.87	6.14	0.05	0.08	3.10	0.076	5.98	0.433	0.343	5.34
Ch- 172	13.78	0.77	32.15	0.32	24.34	0.02	0.08	4.38	0.153	3.55	0.460	0.037	20.14
Ch- 173	7.76	1.03	68.44	5.81	8.24	0.03	0.07	2.89	0.388	3.52	0.081	0.031	7.49
Ch- 174	43.91	7.25	27.47	1.07	7.68	0.04	0.08	2.02	4.250	0.82	0.007	0.068	6.33
Ch- 175	19.71	3.36	27.34	7.61	22.12	0.01	0.06	5.53	0.256	2.72	1.013	0.345	17.23
Ch- 176	9.56	1.23	73.57	3.01	4.29	0.13	0.09	1.85	0.093	4.28	0.846	0.004	3.85
Ch- 177	13.72	1.98	35.47	1.41	21.16	0.22	0.05	4.93	0.051	1.83	0.749	0.028	19.43
Ch- 178	18.28	2.53	55.76	7.12	7.00	0.01	0.05	3.56	3.370	2.37	0.319	0.054	6.34
Ch- 179	17.38	2.84	64.70	7.16	4.53	0.01	0.03	2.19	0.189	4.24	0.453	0.038	3.34
Ch- 180	10.92	1.02	68.89	2.93	6.27	0.02	0.02	1.63	0.254	2.77	2.350	0.088	5.45
Ch- 181	25.37	3.23	47.37	2.09	9.5	0.41	0.18	2.52	0.334	0.56	0.611	0.027	9.57
Ch- 182	29.29	1.36	40.27	6.46	9.33	0.03	0.04	5.93	0.389	2.88	1.023	0.016	9.37
Ch- 183	0.74	0.07	71.32	7.11	11.17	0.19	0.01	4.55	0.260	1.75	0.251	0.074	9.43
Ch- 184	6.60	0.09	76.40	13.24	3.63	0.03	0.07	5.12	0.095	3.51	0.960	0.017	3.11
Ch- 185	28.04	1.54	51.24	6.23	7.24	0.04	0.07	2.48	0.207	2.30	0.300	0.041	6.34
Ch- 186	46.80	4.42	31.22	1.54	6.46	0.01	0.02	4.19	0.099	0.58	0.386	0.034	5.29
Ch- 187	3.26	0.19	73.62	12.17	3.14	0.03	0.05	8.78	0.247	5.96	1.107	0.006	3.31
Ch- 188	8.39	0.04	18.35	9.95	33.38	0.08	0.17	4.88	3.180	3.39	0.606	0.008	27.34
Ch- 8A	0.49	0.36	52.35	-	12.20	0.31	0.14	1.55	0.020	4.58	0.010	0.060	-
Ch- 8F	1.58	0.56	59.32	-	9.14	0.16	0.23	0.66	0.010	2.42	0.010	0.060	-

زمین‌شناسی منطقه

منطقه چاه پلنگ در پهنه زمین‌ساختی ایران مرکزی جای دارد (شکل ۱). بلوک یزد نیز بخش باختری خردقاره شرق- ایران مرکزی است و از شمال با گسل درونه و از باختر با پهنه افیولیتی نایین- بافت فراگرفته شده است (Aghanabati, 2004). در نئوپروتوزوییک پسین- کامبرین پیشین، بلوک یزد در موقعیت پهنه ماگمایی جای داشته است و در پالئوزوییک- تریاس میانی، رسوب‌های پلاتفرمی و فلات قاره‌ای آن را پوشانده‌اند (Wendt et al., 2005). در تریاس پسین، این بخش به دنبال برخورد با صفحه توران، به عنوان پیش‌بوم

رشته‌کوه‌های کیمیرین عمل کرده و محل انباشته شدن رسوب‌های فیلیشی و مولاسی گروه شمشک شده است (Wilmsen et al., 2009; Zanchi et al., 2009). به دنبال فرورانش صفحه اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه قاره‌ای ایران مرکزی در ژوراسیک میانی، دگرریختی و دگرگونی رسوب‌های گروه شمشک و سنگ‌های کهن‌تر رخ داده است (Sheibe et al., 2010; Agard et al., 2011). فرایندهایی ماگمایی در این بخش، در ژوراسیک فعال بوده‌اند و توده‌های گرانیتوئیدی شیرکوه یزد، زرین و آثار اندک رخنمون‌یافته در منطقه چاه پلنگ از این دسته به‌شمار می‌روند.



شکل ۱- جایگاه پهنه‌های ساختاری اصلی ایران و منطقه بررسی شده (Stöcklin, 1977)

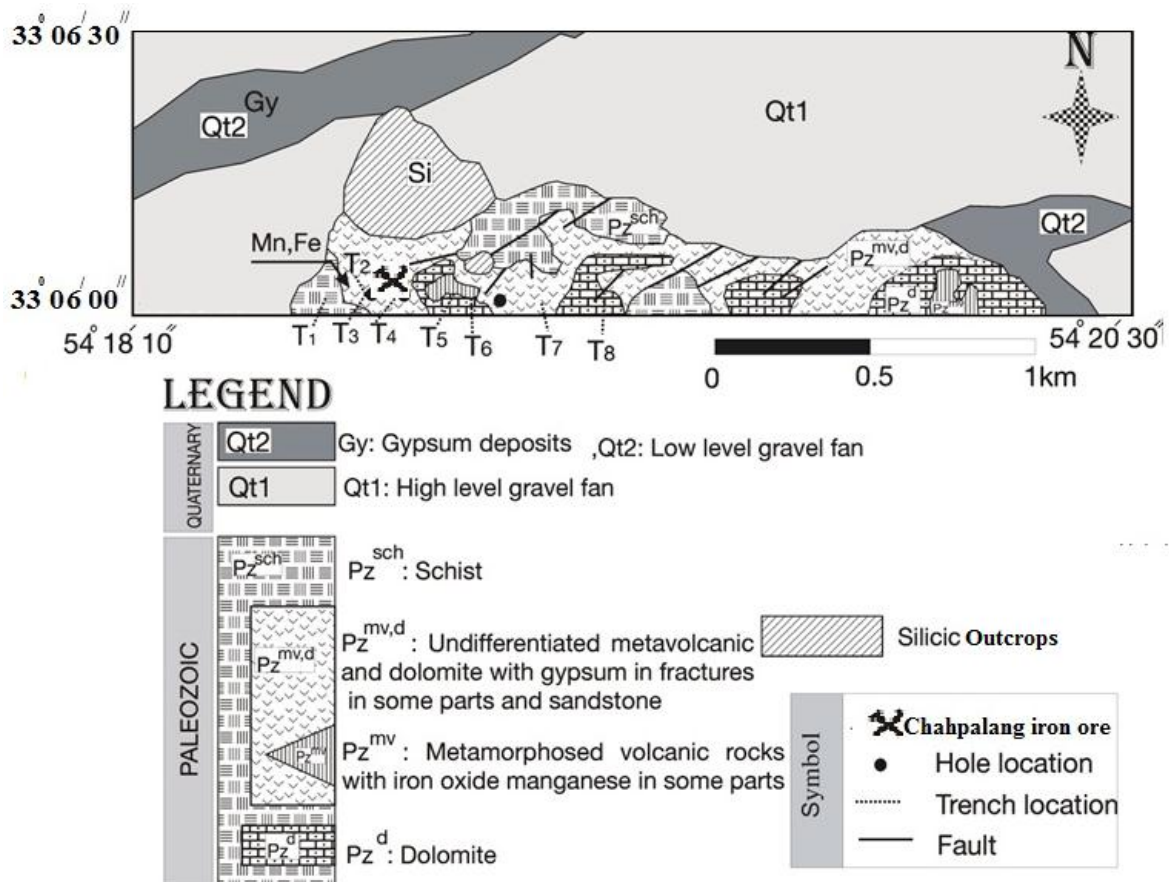
می‌دهند. این گروه‌های سنگی روی سازند شمشک فرسایش یافته سازند قرمز زیرین و سازند قم جای گرفته‌اند و روی آنها نوار باریک از کنگلومرای پلیوسن دیده می‌شوند (Aghanabati, 2004) (شکل ۲). برونزدی از سنگ‌های متابازیت (متاگابرو و متاداباز و متابازالت) به سن پالئوزویک نیز در کوه چاه‌پلنگ رخمون دارند. متابازیت‌ها به صورت تپه‌هایی با گسترش کم و به رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه برونزد دارند. دایک‌های متاداباز و متاگابرو به صورت برجسته در میان متابازالت‌ها دیده

از دیدگاه جایگاه، کانسنگ آهن چاه‌پلنگ زمین‌شناسی، در جنوب‌خاوری نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کبودان و در جنوب‌باختری نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ فرخی جای گرفته است. کهن‌ترین رخنمون‌های سنگی در منطقه چاه‌پلنگ، سنگ‌های دگرگونه کمپلکس انارک (مانند: شیسیت، مرمرو و آمفیبولیت) با سن پرکامبرین هستند و نهشته‌های کربناتی-خشکی‌زاد، کرتاسه-سنوزویک پوشش آنهاست. در این منطقه، سازند شمشک و نهشته‌های کواترنری بیشترین گستردگی را نشان

سنگ‌نگاری

بر پایه ویژگی‌های صحرایی و نقشه‌های موجود از منطقه، سنگ‌های شیستی، متاولکانیک‌ها و سنگ‌های کربناتی با تبلور دوباره که بیشترین رخمون را در منطقه بررسی شده دارند، بررسی می‌شوند.

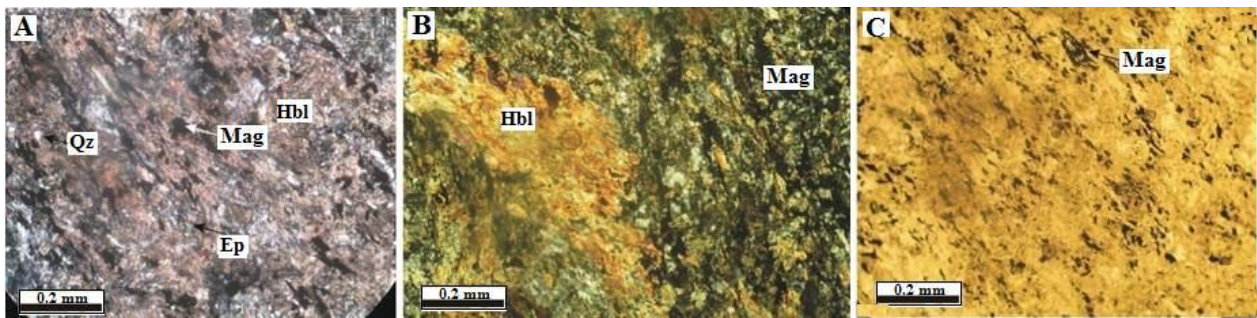
می‌شوند. متابازالت‌های چاه‌پلنگ در پی رفتار گسل‌ها، برگوارگی آشکاری پیدا کرده‌اند (Bayat and Torabi, 2012). رخمون‌های کوچکی از سنگ‌های گرانیتویدی دگرسان‌شده نیز در منطقه بررسی شده دیده شده‌اند (Technoexport, 1982).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه چاه‌پلنگ، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰؛ شرکت آری‌زمین (Arian Zamin, 2012)

(شکل‌های ۳- A و ۳- B). همچنین، در مقطع‌های صیقلی تهیه‌شده از این واحد سنگی، مگنتیت کشیدگی نشان می‌دهد. این ویژگی پیامد اعمال فرایندهای زمین‌ساختی در دمای بالاست (شکل ۳- C). ویژگی‌های بافتی، کانی‌شناسی این سنگ‌ها نشان می‌دهند سنگ نخستین آن یک سنگ آذرین بازیک بوده است.

الف- سنگ‌های شیستی: در منطقه چاه‌پلنگ، سنگ‌های شیستی رنگ سبز زیتونی و سبز کمرنگ دارند و از کلریت‌شیست تا آمفیبول‌شیست در تغییر هستند. کانی‌های سازنده آنها عموماً آمفیبول، کوارتز ریزبلور، کلریت، اپیدوت و اکسیدهای فلزی هستند و در مقطع میکروسکوپی، بافت نامتوبلاستیک دارند



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ دربرگیرنده در منطقه چاه‌پلنگ: (A) سنگ‌های شیستی مگنتیت‌دار (در PPL؛ B) جهت‌یافتگی و کشیدگی بلورهای هورنبلند در کنار مگنتیت، اپیدوت و کلسیت (در XPL؛ C) واحد شیستی با جهت‌یافتگی دانه‌های مگنتیت در زمینه کلریت‌شیست (در PPL) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) هستند؛ Qz: کوارتز؛ Mag: مگنتیت؛ Ep: اپیدوت؛ Hbl: هورنبلند)

همگی در پی دگرگونی دچار تبلور دوباره شده و مرمی شده‌اند. این سنگ‌ها بیشتر به‌همراه متاولکانیک‌ها میزبان ماده معدنی هستند (شکل ۴).

ب- سنگ‌های کربناتی: سنگ‌های کربناتی بیشترین برونزد را در محدوده چاه‌پلنگ دارند. این سنگ‌ها به رنگ‌های خاکستری و نخودی هستند و



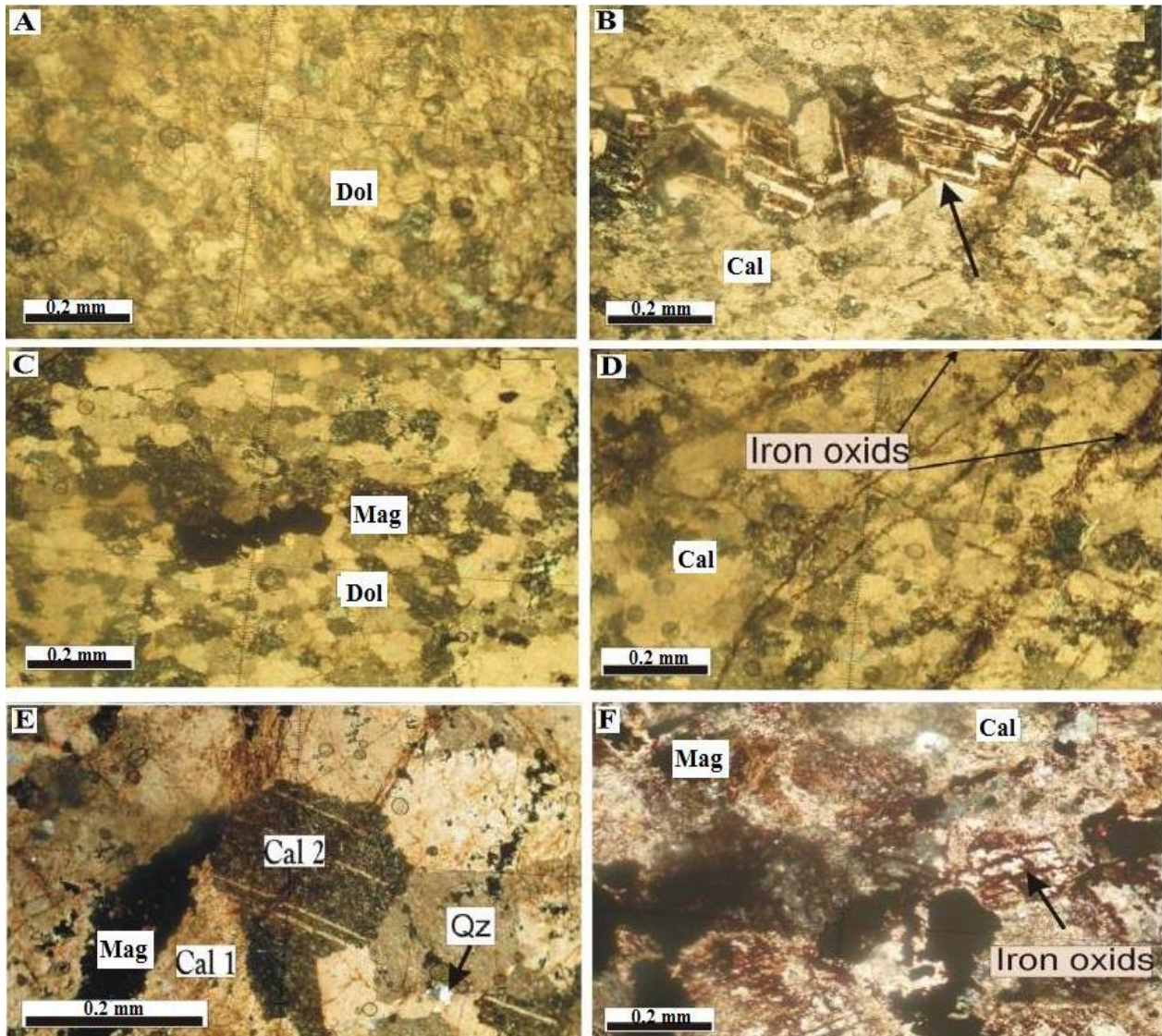
شکل ۴- ماده معدنی به‌همراه دولومیت‌های دگرگون‌شده در ترانشه حفرشده (دید رو به شمال)

هنگام دیاژنز در سنگ رخ داده است (Kamali et al., 2012). در محل استیلولیت‌ها که مقطع زیگزاگی دارند، کانی‌های رسی و اکسید آهن انباشته شده‌اند (شکل ۵- B). در برخی از نمونه‌ها، همه زمینیه از میکریت ساخته شده است و بدون دانه است. رگه‌هایی پر شده از کوارتز ریزدانه و کانی‌های تیره اکسید آهن در این سنگ‌ها دیده می‌شوند (شکل‌های ۵- C، ۵- D و ۵- F). رخ‌های

از دیدگاه کانی‌شناسی، در بررسی‌های میکروسکوپی سنگ‌های کربناتی منطقه از دانه‌های هم‌بعد ساخته شده‌اند. بیشتر از ۹۰ درصد حجمی کانی‌های سازنده این سنگ‌ها دولومیت است؛ از این رو نام این سنگ دولومیت یا دولستون است. کانی‌های دولومیت این سنگ شکل نامنظمی دارند (شکل ۵- A). در برخی از آنها، پدیده استیلولیتی شدن دیده می‌شود که در

شیستی شدن سنگ‌های منطقه، در سنگ‌های کربناتی منطقه‌اند (شکل ۵- E).

مشخصی در کلسیت‌های ثانویه دیده می‌شوند که پیامد تبلور دوباره یا دگرریختی هنگام



شکل ۵- تصویرهای میکروسکوپی از واحد کربناته در منطقه چاه‌پلنگ. (A) دولستون (در PPL)؛ (B) بافت استیلولیتی (در PPL)؛ (C) مگنتیت‌های نیمه‌شکل‌دار (در XPL)؛ (D) پرشدگی درزه‌های سنگ میزبان کربناته با اکسیدهای آهن (در PPL)؛ (E) کلسیت‌های ثانویه با تبلور دوباره و شکل‌دار در کنار کلسیت‌های ریزدانه نخستین؛ (F) پرشدگی شکستگی سنگ کربناته با اکسیدهای آهن به‌همراه بلورهای بی‌شکل مگنتیت در این سنگ‌ها به‌صورت بلورهای بی‌شکل مگنتیت (در XPL) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰): Qz: کوارتز، Mag: مگنتیت، Dol: دولومیت، Cal: کلسیت)

آذرین نخستین خود را تا اندازه‌ای در خود نگه داشته‌اند، اما اکنون آمفیبولیت و شیست‌سبز جایگزین آنها شده‌اند، به‌گونه‌ای که متاولکانیک

پ- سنگ‌های متاولکانیک: در منطقه چاه‌پلنگ، اگرچه سنگ‌های ولکانیک سرشت (بافت و ساخت و ترکیب کانی‌شناسی) سنگ

دگرسان شده‌اند. در مقطع‌های میکروسکوپی، پلاژیوکلاز بسیار دگرسان و با اپیدوت جایگزین شده است (شکل‌های A-۷ و B-۷). همچنین، مگنتیت در مرزهای بلوری پلاژیوکلاز دیده می‌شود. دگرسانی‌های یادشده پیامد متاسوماتیسم رخ داده در منطقه هستند.



شکل ۶- تصویر صحرایی از متاولکانیک‌های منطقه. (A) سنگ میزبان که دگرسانی کلریتی نیز نشان می‌دهد و کمر پایین ماده معدنی را می‌سازد؛ (B) برشی شدن در سنگ‌های متاولکانیک منطقه در نزدیکی ماده معدنی

دگرسانی

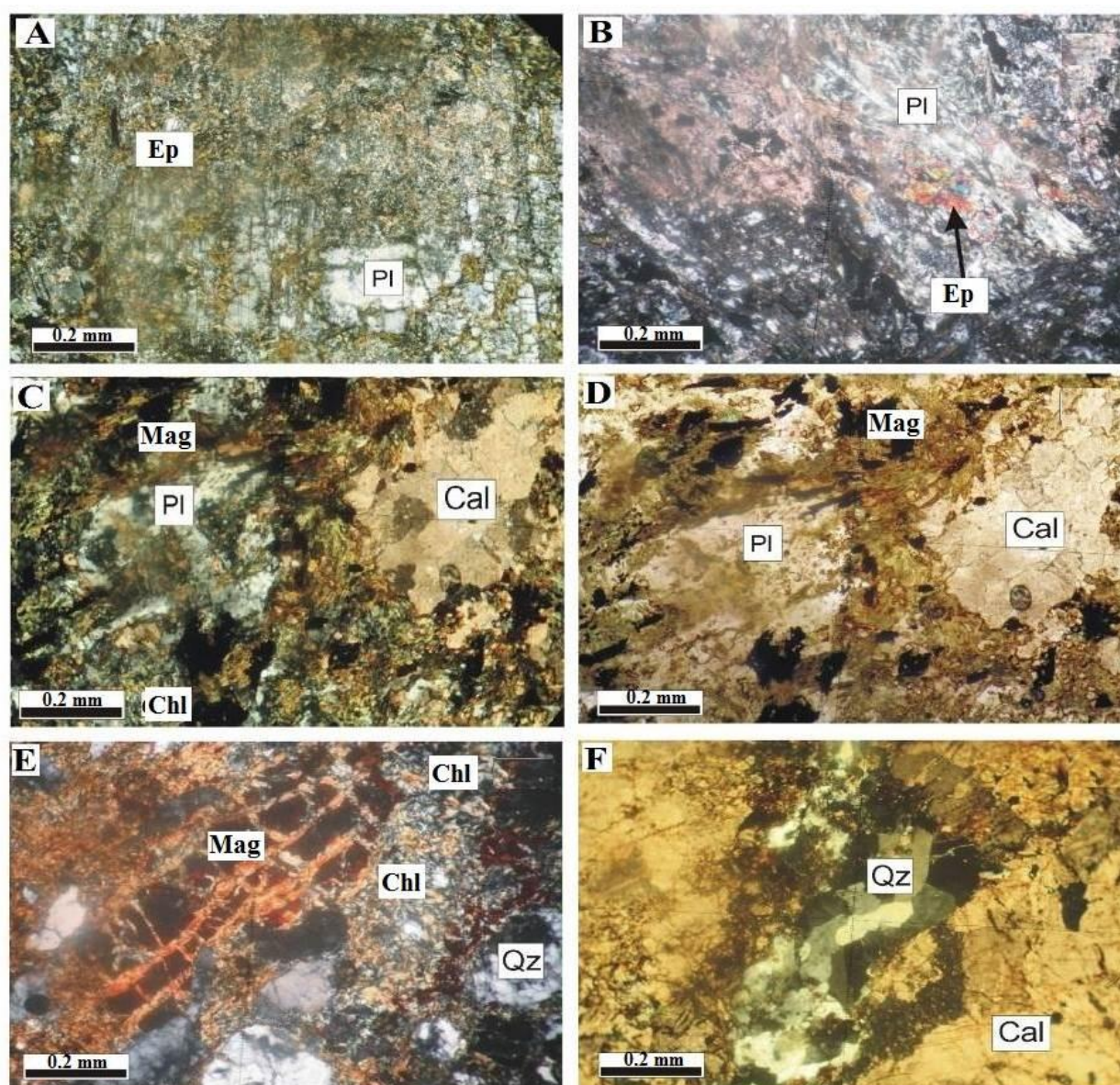
بررسی‌های کانی‌شناسی و بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد سیلیسی شدن و پروپلیتیکی شدن (اپیدوتی و کلریتی) از مهم‌ترین دگرسانی‌های رخ داده در این منطقه هستند.

دگرسانی پروپلیتیک از اصلی‌ترین دگرسانی‌های سنگ میزبان به‌شمار می‌آید که به‌صورت رگه‌ای و پراکنده دیده می‌شود. کلریت، اپیدوت و کلسیت از کانی‌های اصلی این دگرسانی هستند که ۳۰ تا ۴۵ درصد حجمی سنگ را دربر می‌گیرند. در این منطقه، زیرپهنه‌های کلریتی و اپیدوتی در پهنه پروپلیتیک دیده می‌شوند. در زیرپهنه اپیدوتی،

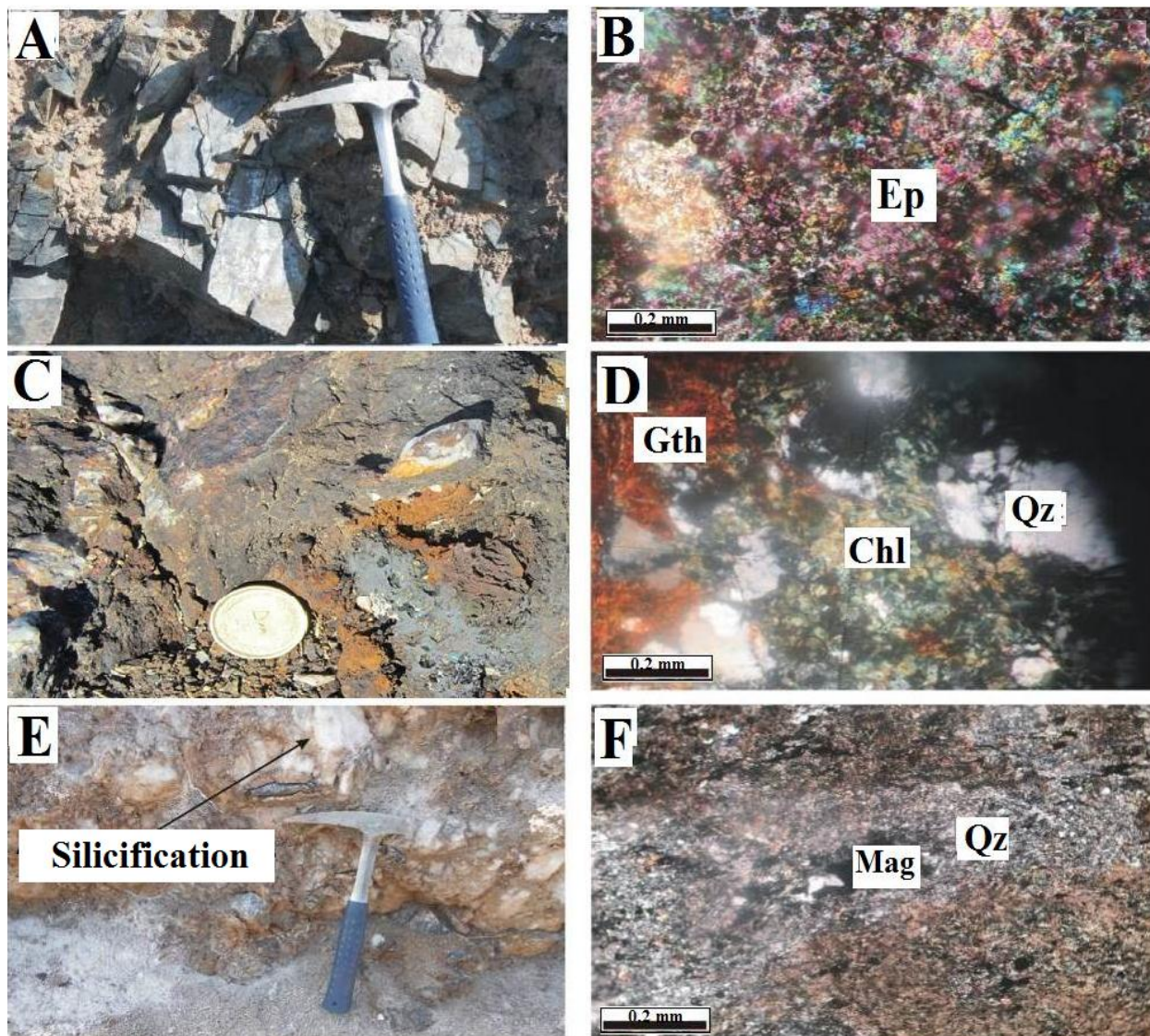
فرایند متاسوماتیسم شامل تزریق و تحرک دوباره عنصرهایی مانند Fe، Mg و Si است و موتور محرکه این جابجایی‌ها گرمای توده آذرین است. کانی کلسیت درشت‌بلور با بافت تبلور دوباره در این گروه سنگی پدیدار شده است. این کانی پیامد دگرگونی کانی‌های نخستین است (شکل‌های C-۷ و D-۷). در برخی نمونه‌ها، زونینگ پلاژیوکلاز به‌خوبی دیده می‌شود. خاموشی موجی در کوارتزهای زمینه، نشانه اعمال نیروهای زمین‌ساختی در این منطقه است (شکل E-۷) (Tabatabaianesh et al., 2011). همچنین، در این سنگ‌ها، کوارتز به‌صورت بی‌شکل نیز دیده می‌شود (شکل F-۷).

سنگ‌های آذرین منطقه دیده می‌شود (شکل‌های C-۸ و D-۸). پیدایش کلریت ثانویه یا پیامد دگرسانی کانی‌های مافیک سنگ است یا پیامد ورود آهن و منیزیم به سنگ توسط محلول‌های گرمایی یا رویداد این دو پدیده با هم است (Evans, 1987).

اپیدوت به صورت توده‌ای و با شکل بلوری نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل دیده می‌شود (شکل‌های A-۸ و B-۸)، پلاژیوکلازها و فلدسپارها در پی فرایند سوسوریتی شدن با اپیدوت جایگزین شده‌اند (Deer et al., 1992). کلریتی شدن نیز در برخی نمونه‌های سنگ میزبان کربناته و



شکل ۷- تصویرهای میکروسکوپی از متاولکانیک‌ها در منطقه چاه پلنگ. A، B) دگرسانی پلاژیوکلاز به اپیدوت (در XPL)؛ C، D) بلورهای مگنتیت در کناره بلورهای پلاژیوکلاز (C در XPL و D در PPL)؛ E) خاموشی موجی در کوارتزهای واحد متاولکانیک و پرشدگی مگنتیت خردشده با لیمونیت (در XPL)؛ F) ته‌نشست دانه‌های سیلیس بی‌شکل در فضاهای تهی (در XPL) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰)؛ Qz: کوارتز؛ Mag: مگنتیت؛ Chl: کلریت؛ Ep: اپیدوت؛ Cal: کلسیت؛ Pl: پلاژیوکلاز)



شکل ۸- تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از دگرسانی‌ها در منطقه چاه‌پلنگ. (A) نمایی از سنگ‌های آذرین دگرسان‌شده در منطقه چاه‌پلنگ؛ (B) دگرسانی اپیدوتی در سنگ‌های آذرین (در XPL) (C) تصویر صحرایی از واحد سنگی کلریتی‌شده (دید روبه شمال‌خاوری)؛ (D) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی کلریتی (در XPL)؛ (E) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی سیلیسی؛ (F) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی سیلیسی (در XPL) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰)؛ Qz: کوارتز؛ Mag: مگنتیت؛ Chl: کلریت؛ Ep: اپیدوت؛ Gth: گوتیت)

افزوده‌شدن سیلیس از محلول‌های گرمابی به شکستگی‌های سنگ و ته‌نشینی درون آنهاست. این رگه‌ها چه‌بسا از جانشینی کانیایی پدید آمده‌اند و دوباره در زمینه سنگ‌ها ته‌نشست پیدا کرده‌اند (Okrusch *et al.*, 2007; Fusswinkel *et al.*, 2014; Ghurchi Ruki *et al.*, 2010).

در این اندیس هر دو پدیده با هم رخ داده‌اند؛ زیرا کلریت به‌صورت دسته‌ای و هم‌به‌صورت جانشینی در کانی‌های فرومنیزین (مانند: هورنبلند) دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی در این منطقه به‌صورت رگه‌ای و پراکنده دیده می‌شود (شکل‌های ۸- E و ۸- F) و نشان‌دهنده

کانه‌زایی

سنگ آهن در محدوده بررسی شده به صورت عدسی و گاه رگه‌ای دیده می‌شود و میزبان متاولکانیک دارد؛ هرچند گاه سنگ‌های کربناتی نیز کانسنگ آهن را دربر می‌گیرد. در این واحد مگنتیت سیاه رنگ و اسپیکولاریت نیز دیده می‌شوند که هوازدگی در برخی بخش‌های آنها رنگ زرد تا نارنجی (لیمونیتی شدن) پدید آورده است (شکل‌های A-9 و B-9). مقدار آهن کل در نمونه‌های کانسنگی اندازه‌گیری شده برابر با ۲۸ تا ۹۱ درصد است. مرز همبری عدسی‌های کانه‌دار با فرادیواره و فرودیواره به خوبی دیده می‌شود. با توجه به منقطع بودن بیرون‌زدگی‌های کانسنگ،

درزای عدسی‌ها برابر با ۲۰ تا ۵۰ متر برآورد می‌شود. همچنین، پهنای بیشترین بیرون‌زدگی برابر با ۵ متر و شیب آنها برابر با ۸۰ تا ۹۰ درجه است. همچنین، راستای بیشتر آنها شمالی-جنوبی است. بخش‌هایی از ذخیره آهن چاه‌پلنگ بافت برشی دارد. گمان می‌رود گسل‌ها نقش مهمی در کنترل کانه‌زایی آهن در منطقه داشته‌اند؛ به گونه‌ای که کانه‌زایی آهن به صورت رگه‌ای با پیروی از راستای شکستگی‌ها و گسل‌های منطقه است. همچنین، این گسل‌ها راه‌های گذر سیال‌های گرمابی و آب‌های جوی هستند و نقش مهمی در دگرسانی کانسنگ و سنگ درونگیر ماده معدنی داشته‌اند.



شکل ۹- A) رخنمونی از کانسار آهن با کانه‌زایی مگنتیت؛ B) کانه‌زایی آهن در یکی از ترانشه‌های حفر شده در کانسار چاه‌پلنگ

کانه‌نگاری و توالی پاراژنزی

مگنتیت، هماتیت و گوتیت از فراوان‌ترین کانی‌های اکسیدی دیده شده در مقطع‌های صیقلی بررسی شده هستند و پیریت تنها سولفید ذخیره است. بافت‌ها نیز شامل پراکنده، توده‌ای، خوردگی، برشی، جانشینی و شبکه‌ای هستند.

مگنتیت: مگنتیت کانه اصلی ذخیره آهن چاه‌پلنگ به شمار می‌رود. در نمونه دستی، این کانی

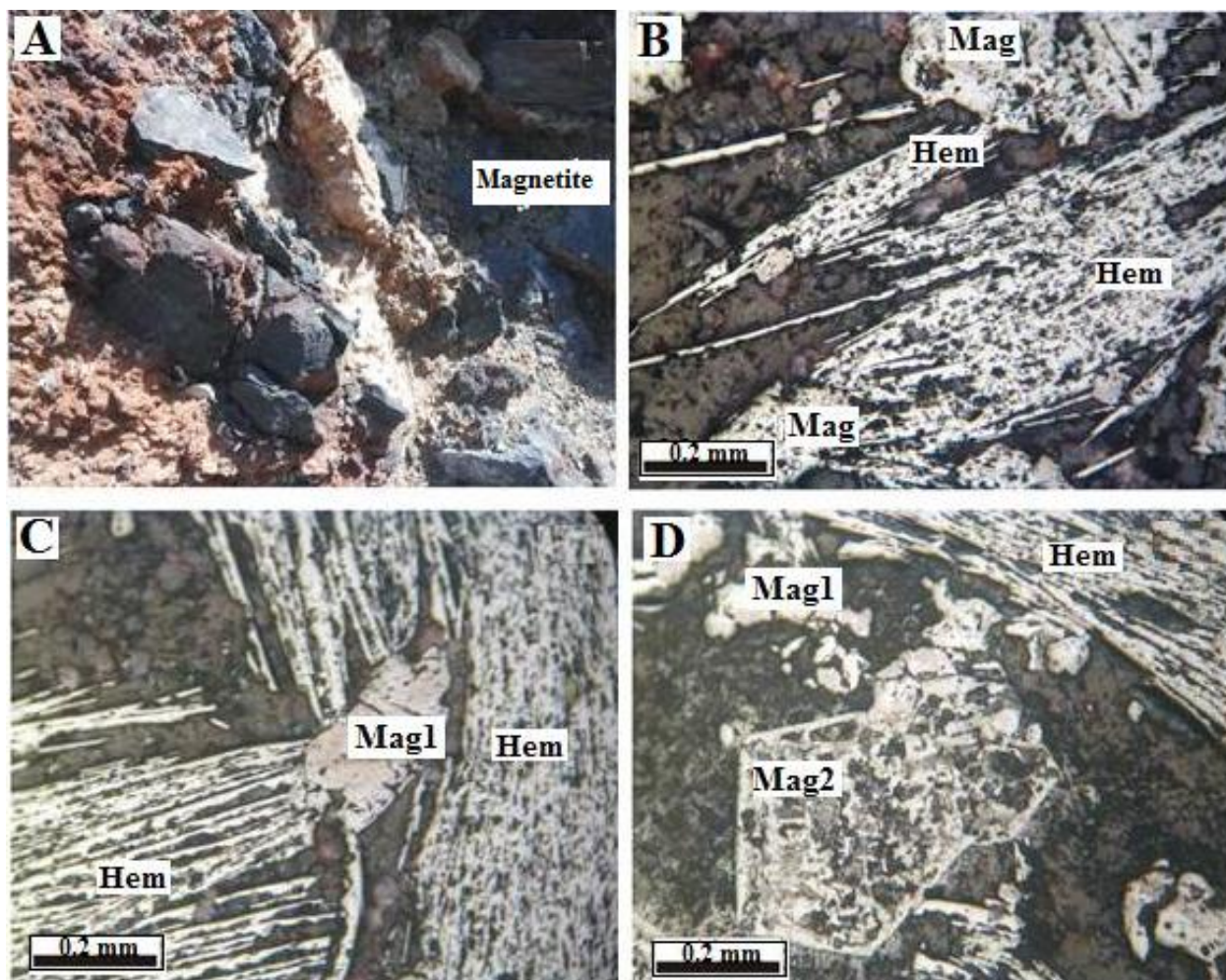
به رنگ تیره و سیاه دیده می‌شود (شکل ۱۰- A). برپایه ویژگی‌های میکروسکوپی، کانه‌زایی مگنتیت در دو مرحله روی داده است:

- نخستین نسل مگنتیت‌ها که همزمان با هماتیت (اسپیکولاریت) پدید آمده‌اند و بیشترشان بی‌شکل هستند (شکل ۱۰- B)؛

- مگنتیت‌های نیمه‌شکل‌دار که از نسل دوم به شمار می‌روند (شکل ۱۰- C).

بافت‌های دیده‌شده در این کانه شامل بافت دانه پراکنده، توده‌ای، خوردگی، برشی و جانشینی هستند.

در برخی مقطع‌ها، نخستین نسل مگنتیت‌ها و نسل دوم آنها در کنار یکدیگر دیده می‌شوند (شکل ۱۰- D).



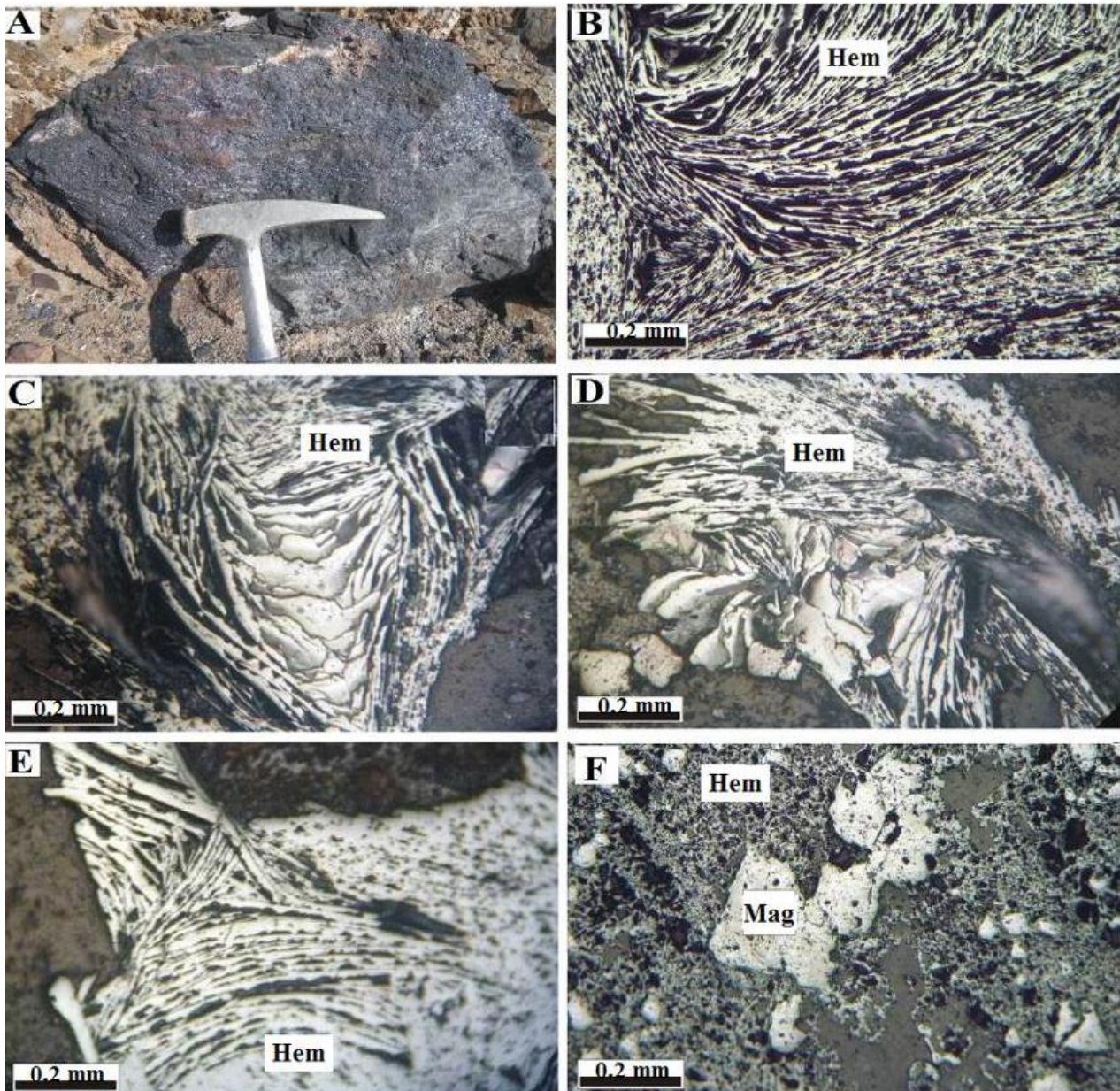
شکل ۱۰- تصاویرهای میکروسکوپی و میکروسکوپی از مگنتیت‌های منطقه چاه‌پلنگ. (A) مگنتیت در نمونه دستی؛ (B) مگنتیت‌های بی‌شکل در مقطع صیقلی که همزمان با اسپیکولاریت پدید آمده است (در PPL)؛ (C) بلورهای مگنتیت در مرکز و بلورهای تیغه‌ای هماتیت پیرامون آن (در نور انعکاسی، PPL)؛ (D) مگنتیت‌های نیمه‌شکل‌دار در کنار نخستین نسل مگنتیت‌های بی‌شکل (در نور انعکاسی، PPL) (نام اختصاری کنی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰)؛ Hem: هماتیت؛ Mag: مگنتیت)

تیره تا نقره‌ای، به‌صورت نخستین پدید آمده است (شکل ۱۱- A). این نسل از هماتیت‌ها پیامد ته‌نشست محلول‌های فوق‌اشباع از آهن در شرایط اکسیدان هستند (Ramdohr, 1980). بزرگی بلورهای هماتیت در مقطع‌های صیقلی، معمولاً از ۰/۱ تا ۲ میلیمتر است. البته گاه تیغه‌هایی با بزرگی ۱۰ میلیمتر نیز در این

هماتیت: هماتیت از کانه‌های اکسیدی مهم ذخیره آهن چاه‌پلنگ است و در بخش‌های سطحی، به رنگ سرخ تیره و حتی سیاه و در نمونه مقاطع صیقلی به رنگ سفید تا کرم دیده می‌شود. در نمونه‌های دستی، بررسی‌های کانه‌نگاری سه نوع هماتیت نخستین شناسایی شده است:
۱- اسپیکولاریت در نمونه‌های دستی به رنگ سرخ

هستند و انباشته شدن تیغه‌ها در کنار یکدیگر، شکل‌های جارو مانند را پدید آورده است (شکل ۱۱- B).

سنگ‌ها دیده می‌شوند. تیغه‌های هماتیت نخستین که در مقطع‌های صیقلی به صورت شکل‌دار و به شکل بلورهای کامل و کشیده



شکل ۱۱- تصویرهای میکروسکوپی (در نور انعکاسی، PPL) و نمونه دست‌آوردی از هماتیت‌های منطقه چاه پلنگ. (A) نمونه دست‌آوردی از اسپیکولاریت‌های منطقه چاه پلنگ؛ (B) بافت دسته‌جاری در بلورهای نخستین نسل هماتیت؛ (C، D) بافت رزآیرن (گل‌رز) در هماتیت؛ (E) خمیدگی بلورهای کشیده هماتیت؛ (F) بافت شبکه‌ای در هماتیت‌های ثانویه که در حال پیدایش از مگنتیت هستند (نام اختصاری کانی‌ها از Evans و Whitney (۲۰۱۰): Hem: هماتیت؛ Mag: مگنتیت)

آورده‌اند و گاه به صورت شبکه‌ای درهم

۲- هماتیت‌هایی که گل‌رز (Rose Iron) را پدید

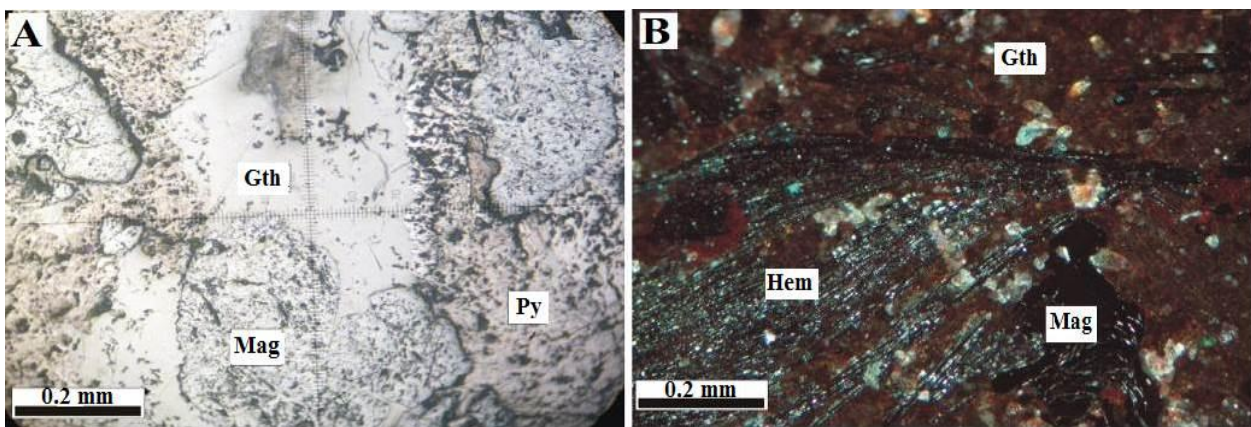
دگرسان شده‌اند و از آنها یک حفره کوبیک تا بی‌شکل به‌جای مانده است. این حفره گاه تهی است و گاه لیمونیت آن را پر کرده است. در نمونه‌های میکروسکوپی، بیشتر بلورهای پیریت بی‌شکل و با بافت موزاییکی ناهمسان دانه به‌همراه مگنتیت و هماتیت و گوتیت دیده می‌شوند (شکل ۱۲- A).

گوتیت: گوتیت یک هیدروکسید آهن است که در محیط‌های سطحی زمین‌شناسی و از تبدیل اکسیدهای آهن (مگنتیت یا هماتیت) در پی هوازدگی شدید پدید می‌آید (Morris, 1980). این کانی در بخش‌های سطحی ذخیره آهن چاه پلنگ با رنگ‌های زرد، قهوه‌ای و سرخ دیده می‌شود. گوتیت از فراورده‌های ثانویه در توالی پاراژنتیکی کانه‌زایی منطقه چاه پلنگ است. در مقطع‌های صیقلی بررسی شده گوتیت در پیرامون بلورهای مگنتیت و هماتیت دیده می‌شود و گاه درزه‌های بلورهای هماتیت خردشده را پر کرده است. در برخی مقطع‌ها نیز گوتیت پیرامون بلورهای پیریت است یا شکستگی‌های ریز بلورهای پیریت را پر کرده است (شکل ۱۲).

آمیخته‌اند (شکل‌های C-۱۱ و D-۱۱). بلورهای مگنتیت در میان این تیغه‌های شبکه‌ای دیده می‌شوند. نسل دوم از هماتیت‌ها که هنگام پدیده مارتیتی شدن مگنتیت پدید آمده‌اند و بخشی از فرایند پیدایش ثانویه هستند، در کناره‌های بلورهای مگنتیت و گاه در مرکز آن دیده می‌شوند. در برخی مقطع‌ها، در بلورهای هماتیت خمیدگی دیده می‌شود. این پدیده پیامد فرایندهای زمین‌ساختی پس از کانه‌زایی آهن در منطقه دانسته می‌شود. در برخی نمونه‌ها، خمیدگی پیامد جان‌شینی مگنتیت با هماتیت و نبود فضای کافی برای رشد بلورهای هماتیت است (شکل E-۱۱).

۳- هماتیت با بافت شبکه‌ای که ویژه مناطق کم‌ژرف برای پیدایش کانه است (شکل F-۱۱) (Ramdohr, 1980). این هماتیت‌ها بافت رورشدی دارند که در آن هماتیت در مرکز و گوتیت در کناره‌ها پدید آمده است. این پدیده به خوبی نشان می‌دهد هماتیت پیش از گوتیت پدید آمده است (Ramdohr, 1980).

پیریت: پیریت در نمونه دست‌ی کانی نایابی است. در نمونه‌های سطحی نیز بیشتر پیریت‌ها



شکل ۱۲- تصویرهای میکروسکوپی از گوتیت در نمونه‌های ماده معدنی اندیس آهن چاه پلنگ. (A) تصویر در نور انعکاسی PPL؛ (B) تصویر در نور XPL (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰)؛ Gth: گوتیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Hem: هماتیت)

در پی افزایش دوباره فوگاسیتئ اکسیژن در محلول‌های کانه‌زا، مارتیت پدید آمده است. در مرحله ثانویه، گوتیت در پی گذر محلول‌های جوی از روی هماتیت پدید آمده است (Schwertmann, 1988). کانی‌های سولفیدی (پیریت) نیز به مقدار اندک در مرحله نخست پدید آمده‌اند. دگرسانی پروپلیتیک همراه با کانه‌زایی در سنگ‌های پیرامون رخ داده است. در مرحله‌های پایانی، با چرخش محلول‌های کانه‌زا در منطقه، سیلیس در شکستگی سنگ میزبان و کانسنگ آهن به‌صورت کوارتز شیری رنگ پدید آمده است (شکل ۱۳) (Fusswinkel et al., 2014).

برپایه شواهد به‌دست‌آمده، کانه‌زایی آهن در این منطقه به‌صورت عدسی و گاه رگه‌ای در سنگ‌های کربناته و آذرین دگرگون‌شده (متاولکانیک) رخ داده است و شامل دو مرحله هیپوژن (اصلی) و ثانویه است. برپایه ویژگی‌های میکروسکوپی، نخست فوگاسیتئ در منطقه بالا بوده است و هماتیت به‌صورت اسپیکولاریت و با تیغه‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار ته‌نشست پیدا کرده است (Ramdohr, 1980). با تغییر و کاهش اندک در فوگاسیتئ اکسیژن محل، ته‌نشست مگنتیت رخ داده است؛ به‌گونه‌ای که در مقطع‌های میکروسکوپی، هم‌رشدی آشکاری در هماتیت و مگنتیت دیده می‌شود. پس از این مرحله،

Minerals	Hypogene Mineralization		Supergene
	Early	Late	
Specularite	██████████		
Magnetite	██████████		
Secondary Hematite		██████████	
Goethite			██████████
Pyrite	██████████		
Quartz		██████████	
Calcite		██████████	
Epidote	██████████		
Chlorite	██████████		

شکل ۱۳- توالی پاراژنزی در کانسنگ آهن چاه پلنگ

الف - عنصرهای اصلی

بررسی‌های زمین‌شیمیایی روی کانسنگ آهن چاه پلنگ نشان می‌دهد مقدار آهن کل در نمونه‌های برداشت‌شده برای تجزیه شیمیایی از ۲۸ تا ۹۱ درصدوزنی تغییر می‌کند. تغییرات بالای مقدار آهن، حتی در فاصله‌های کوتاه در نهشته‌های معدنی، نشان‌دهنده پیدایش اکسیدهای آهن از راه پرکردن فضاهای تهی در سنگ‌های میزبان منطقه است. این پدیده چه بسا پیامد حضور درزه و شکستگی با ابعاد

زمین‌شیمی کانسنگ در رخداد آهن چاه پلنگ

چگونگی توزیع و پراکندگی عنصرهای گوناگون در واحدهای سنگی هر منطقه و وابستگی این عنصرها با یکدیگر، از مهم‌ترین جنبه‌هایی است که معمولاً در بررسی‌های زمین‌شیمیایی به آن پرداخته می‌شود. برپایه این روابط به ویژگی‌های محیط پیدایش و فرایندهای مؤثر در پیدایش کانسار پی برده می‌شود (Nabatian et al., 2009). داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نمونه‌های کانساری در جدول شماره ۱ دیده می‌شوند.

مقدار گوگرد در نمونه‌های تجزیه شده برابر با ۰/۰۰۴ تا ۰/۴۵ درصدوزنی است. عنصر گوگرد با آهن همبستگی اندکی (۰/۰۱) نشان می‌دهد (شکل ۱۴ - D). پیریت با فرمول FeS_2 حمل‌کننده گوگرد به شمار می‌رود. از آنجایی که پیریت در کانسنگ آهن چاه‌پلنگ کم است، گوگرد همبستگی ضعیفی با آهن نشان می‌دهد.

میزان تیتانیوم TiO_2 در نمونه‌های کانسنگ منطقه برابر با ۰/۰۱ تا ۴/۲۵ درصدوزنی است. تیتانیوم معمولاً به ساختار مگنتیت افزوده می‌شود و مقدار بالایی در تجزیه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، نمونه‌ها در دو گروه جای می‌گیرند. از آنجایی که مگنتیت‌های منطقه در دو نسل پدید آمده‌اند، مقدار تیتانیوم در هر نسل متفاوت است. بخش A در شکل ۱۴ - E کانسنگ مگنتیتی دانسته می‌شود که کانی ایلمنیت دارد؛ اما بخش B کانسنگ مگنتیتی است که تیتانیوم کمی دارد و کانی ایلمنیت ندارد.

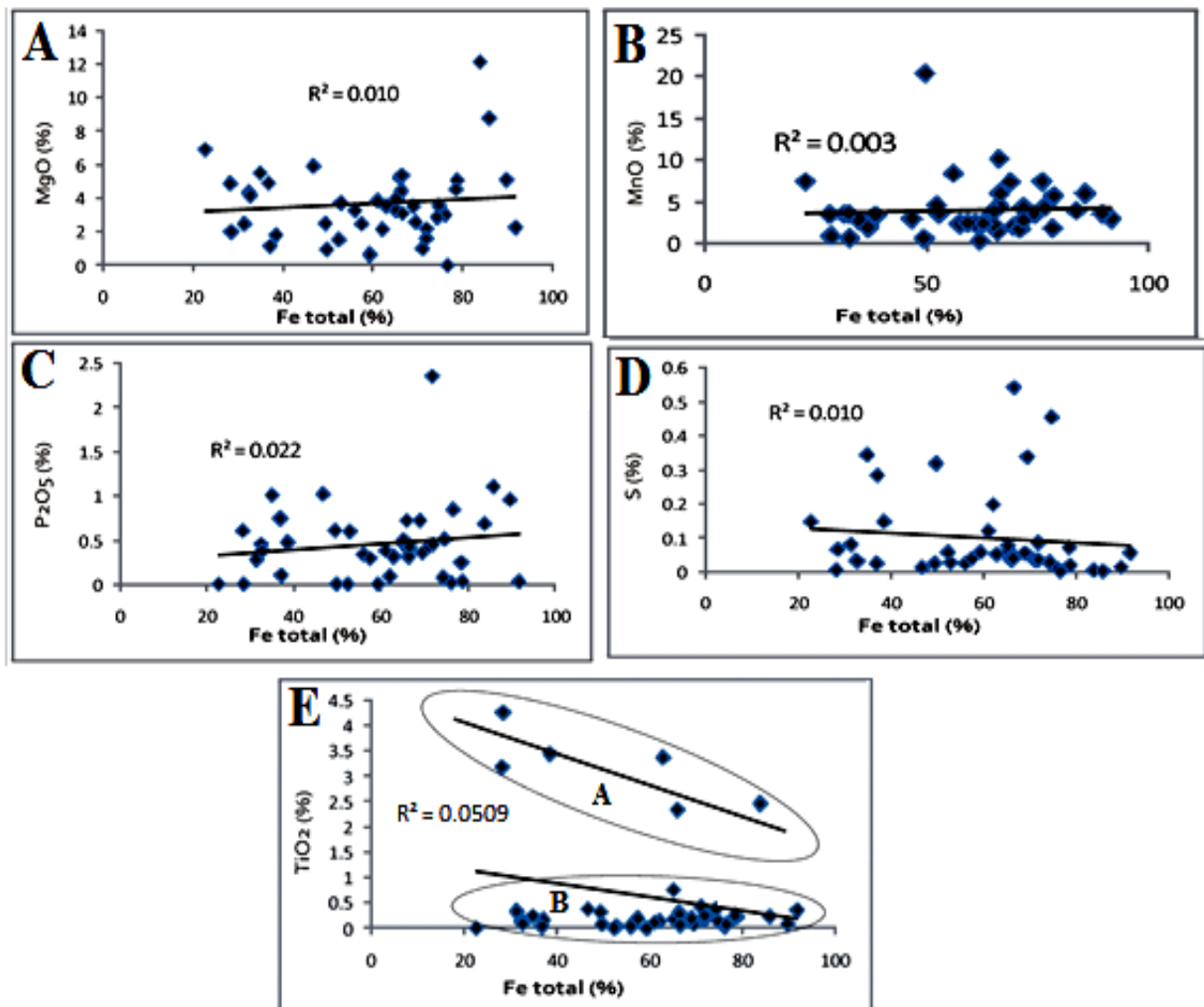
برای شناخت وابستگی زایشی میان عنصر آهن با عنصرهای همراه، ضریب همبستگی این عنصرها با روش پیرسون (Pearson) نیز با به‌کارگیری نرم‌افزار SPSS به دست آورده شد. برپایه جدول ۳، عنصر آهن بیشترین همبستگی را با عنصر منگنز نشان می‌دهد، زیرا رفتار زمین‌شیمیایی این دو عنصر یکسان است.

گوناگون در سنگ میزبان است (Ohmoto, 2003). میزان منیزیم در کانسنگ آهن چاه‌پلنگ، برابر با ۰/۶۶ تا ۱۲/۱۶ درصدوزنی است. این مقدار منیزیم برای کانسنگ آهن کمابیش بالا به نظر می‌رسد. همبستگی کمی مثبت این عنصر (۰/۰۱) با آهن در شکل ۱۴ - A نشان داده شده است. این همبستگی چه‌بسا پیامد حضور منیزیم در مگنتیت به صورت جانشینی Fe^{+2} و همچنین، وجود کانی‌های فرومنیزین سیلیکاته به همراه کانسنگ است.

منگنز ویژگی زمین‌شیمی مشابه آهن دارد و به ترکیب مگنتیت نیز می‌تواند افزوده شود (Krauskopf and Bird, 1976). مقدار منگنز کانسنگ برابر با ۰/۵۶ تا ۱۰/۱۵ درصدوزنی است و در نمونه‌های کانسنگی اندیس چاه‌پلنگ، همبستگی مثبت اندکی (۰/۰۰۳) با آهن نشان می‌دهد (شکل ۱۴ - B). دلیل همبستگی مثبت این عنصر با آهن، جانشینی Fe و Mn به جای هم در مگنتیت دانسته می‌شود. عنصر منگنز ویژگی‌های شیمیایی نزدیکی به آهن دارد و چه‌بسا جانشین آن شود. این جانشینی از جانشینی‌های رایج در اندوخته‌های آهن به شمار می‌رود (Barati, 2008). مقدار فسفر در نمونه‌های تجزیه شده این منطقه برابر با ۰/۰۰۷ تا ۲/۳۵ درصدوزنی است. همبستگی این عنصر با آهن مثبت (۰/۰۲) است (شکل ۱۴ - C).

جدول ۳- ضریب‌های همبستگی پیرسون به دست آمده برای نمونه‌های بررسی شده کانسنگ آهن چاه‌پلنگ

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
SiO ₂	1									
Al ₂ O ₃	0.447	1								
Fe ₂ O ₃	-0.393	-0.502	1							
CaO	-0.237	0.179	-0.766	1						
Na ₂ O	-0.096	-0.038	-0.062	0.126	1					
K ₂ O	-0.218	0.490	-0.299	0.391	-0.011	1				
MgO	-0.106	-0.270	0.176	-0.173	-0.253	-0.214	1			
TiO ₂	0.127	0.483	-0.327	0.181	-0.227	0.0392	0.139	1		
MnO	-0.328	-0.342	0.311	-0.200	-0.161	-0.026	0.223	-0.230	1	
P ₂ O ₅	0.000	-0.105	0.074	-0.055	-0.182	-0.073	0.299	-0.054	-0.024	1



شکل ۱۴- نمودار همبستگی میان آهن با اکسیدهای اصلی و گوگرد (برپایه درصدوزنی) در نمونه‌های اندیس آهن چاه پلنگ. (A: MgO؛ B: MnO؛ C: P₂O₅؛ D: S؛ E: TiO₂)

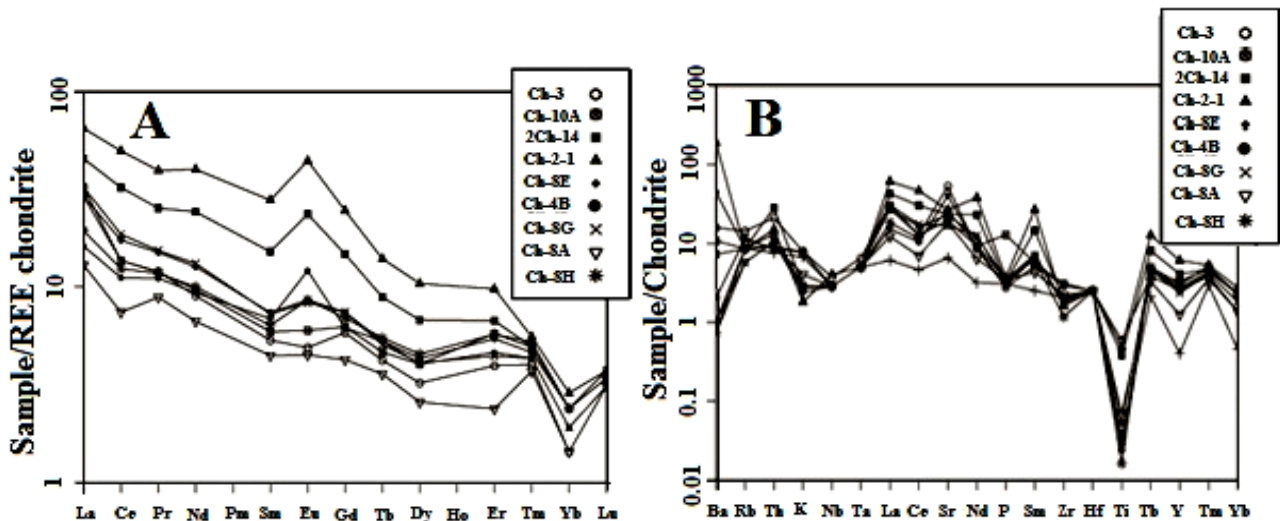
مقدار Σ REE برابر با ۱۰/۹۱ تا ۱۱۰/۶۷ ppm است. همچنین، مقدار Σ HREE برابر با ۱،۵۱ تا ۱۳/۲۳ و میانگین آن برابر با ۵/۶۵ ppm است. مقدار Σ LREE نیز برابر با ۹/۴ تا ۹۷/۳۵ و میانگین آن برابر با ۳۶/۳۱ است. این مقادارها نشان‌دهنده غنی‌شدگی نمونه‌ها از LREE و جدایش شدید میان LREE و HREE هستند. الگوی پراکندگی عنصرهای REE برپایه نمودار Boynton (۱۹۸۴) مربوط به اندیس آهن چاه پلنگ در شکل ۱۵- A نشان داده شده است. برپایه این نمودار، LREEها در برابر HREE و

ب- عنصرهای خاکی کمیاب

کانسارهایی که سامانه‌های گرمابی آنها را پدید می‌آورند ترکیباتی از عنصرهای کمیاب دارند که گویای شرایط حمل و نقل و ته‌نشینی با محلول‌های گرمابی هستند (Naslund *et al.*, 2000). به‌طور معمول از الگوی رفتاری عنصرهای خاکی کمیاب در مواد معدنی برای تفسیر تاریخچه پیدایش و خاستگاه کانسارها بهره گرفته می‌شود (Cullers and Graf, 1984; Lottermoser, 1992). برپایه جدول ۱، در نمونه‌های تجزیه‌شده از اندیس آهن چاه پلنگ

معلق آن را جذب سطحی و حمل می‌کنند یا در صورت حضور لیگاندهای کربناتی در سیال کربناتی، از محیط خارج می‌شود؛ از این‌رو، بی‌هنجاری کمابیش منفی آن در کانسنگ‌های هماتیتی چه بسا نشانهٔ اکسیدشدن و خروج آن از محیط است (Spangenberg *et al.*, 1999). الگوی عنصرهای REE کانسار آهن منطقهٔ چاه‌پلنگ، از La غنی‌شدگی نشان می‌دهد. این پدیده پیامد دارا بودن اپیدوت در کانسنگ و اپیدوتی‌شدن سنگ میزبان در این منطقه است (Jiang *et al.*, 2007). در شکل ۱۵-B، الگوی پراکندگی بیشتر عنصرهای کمیاب و فرعی آورده شده است که به ترکیب کندریت CI بهنجار شده‌اند. برپایهٔ آنچه در نمودار دیده می‌شود، نمونه‌های اندیس چاه‌پلنگ در عنصرهای با قدرت میدان بالا (مانند: Nb, Zr و Ta) و کاتیون نامتحرک Ti تهی‌شدگی نشان می‌دهند که از ویژگی‌های کانسارهای گرمابی است (Bao *et al.*, 2004).

MREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی عنصرهای LREE در برابر HREE در ذخیره‌های آهن مرتبط با سیال‌های گرمابی، در نقاط گوناگون دنیا گزارش شده است (Helvaci, 1984; Barker, 1995; Marschik and Fontbote, 2001). در این نمودار (شکل ۱۵-A)، آنومالی مثبت Eu و منفی Ce دیده می‌شود. میزان غلظت عنصر Eu در کانسارهای آهن گوناگون کاملاً متفاوت است. سیال‌های گرمابی از این عنصر غنی‌شدگی نشان می‌دهند (Lottermoser, 1992). به باور Sverjensky (۱۹۸۴)، غنی‌شدگی بالا از Eu یا بازتابی از دمای بیشتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد است یا کاهش دما به هنگام آمیختگی سیال‌ها با دو خاستگاه متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین، در داده‌های REE منطقه بی‌هنجاری منفی از عنصر Ce دیده می‌شود. از آنجایی که Ce^{+3} در محیط‌های اکسیدی به آسانی به Ce^{+4} اکسیده می‌شود، با کاهش شعاع، هیدروکسیدها و ذرات



شکل ۱۵- A) الگوی پراکندگی REE در کانسنگ چاه‌پلنگ بهنجار شده به ترکیب کندریت (Taylor and McLennan, 1985)؛ B) الگوی پراکندگی عنصرهای کمیاب در کانسنگ آهن چاه‌پلنگ بهنجار شده به ترکیب کندریت (Taylor and McLennan, 1985)

برده می‌شود. در نمونه‌های چاه‌پلنگ، این نسبت La/Sm_n ۲/۳۳ تا ۴/۹۲ است. این مقدار شیب منفی را از La

نسبت $(La/Sm)_n$ برای بررسی درجهٔ جداکردن عنصرهای خاکی کمیاب سبک از سنگین به‌کار

الف- الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب در نمونه‌های کانسنگ مگنتیتی کانسارهای آهن رسوبی در شکل ۱۶-A نشان داده شده است. آنومالی مثبت Eu و آنومالی منفی قوی Ce از ویژگی‌های شناخته شده کانسارهای آهن رسوبی است. آنومالی مثبت Eu در این نوع کانسارها را پیامد افزوده شدن سیال‌های گرمابی داغ و سرشار از Eu به اقیانوس‌ها می‌دانند (Barret et al., 1988). آنومالی منفی و قوی Ce نیز از ویژگی‌های شناخته شده کانسارهای آهن گرمابی زیردریایی است (Fryer, 1977). وجود آنومالی مثبت Eu و منفی Ce همراه در کانسارهای رسوبی نیز نشان‌دهنده اینست که کانسنگ به صورت رسوبگذاری شیمیایی و در حضور سیال‌های گرمابی زیردریایی نهشته شده است. از دیگر ویژگی‌های این کانسارها، غنی شدگی از HREE در برابر LREE است که در تضاد با الگوی پراکندگی REE‌های منطقه چاه پلنگ است.

ب- در شکل ۱۶-B، الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب برای ذخایر آهن گرمابی رسم شده است. این نمودار یک نمودار کاهشی است که در آن میزان عنصرهای LREE از HREE بسیار بیشتر است. این ویژگی نشان‌دهنده نقش محلول‌های گرمابی در پیدایش این کانسارهاست. در این شکل برای مقایسه، الگوی مربوط به کانسنگ چاه پلنگ نیز آورده شده است. کانسنگ چاه پلنگ از دیدگاه غنی شدگی از LREE بسیار همانند کانسارهای گرمابی است. آنومالی مثبت Eu و کمی منفی Ce، از ویژگی‌های شناخته شده کانسارهای آهن گرمابی است (Tallarico et al., 2005) که در ذخیره چاه پلنگ نیز دیده می‌شود. پ- در کل برپایه نوع سنگ واکنش‌دهنده، کانسارهای

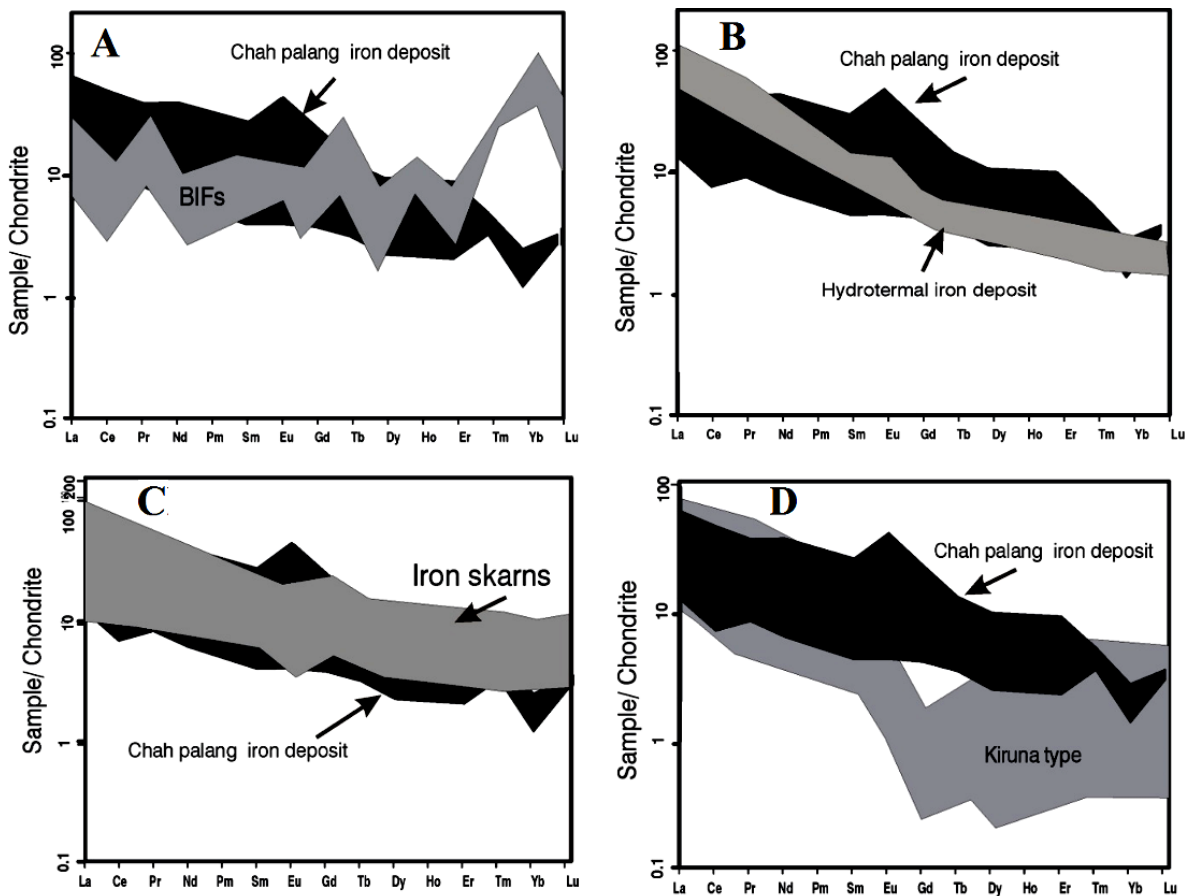
به Sm در الگوی پراکندگی REE کانسنگ چاه پلنگ پدید آورده است (جدول ۱). نسبت $(Gd/Yb)_n$ ، برای بررسی درجه تفکیک عنصرهای خاکی کمیاب سنگین از Yb کاربرد دارد. این نسبت در نمونه‌های کانسنگ آهن چاه پلنگ برابر با ۲/۶۲ تا ۸/۵۶ است. هرچه این پارامترها مقدار عددی بیشتری داشته باشند، نشان‌دهنده اینست که جدایش این دو عنصر بیشتر و کامل‌تر بوده است. نسبت $(Gd/Lu)_n$ نیز پارامتری است که میزان گستردگی تفکیک میان عنصرهای خاکی کمیاب سبک و سنگین را نشان می‌دهد. این پارامتر در کانسنگ چاه پلنگ برابر با ۰/۷۷ تا ۶/۵۸ است (جدول ۱). نسبت $\sum LREE/\sum HREE$ در نمونه‌های منطقه چاه پلنگ برابر با ۴/۸۶ تا ۷/۳ و مقدار میانگین آن برابر با ۶/۱ است. برپایه پیشنهاد Tallarico و همکاران (۲۰۰۵)، عنصرهای خاکی کمیاب در سیستم‌های ماگمایی یک رفتار ترجیحی نسبت به فاز جامد یا فاز مذاب نشان می‌دهند. همه نسبت‌های یادشده نشان‌دهنده سیال‌های گرمابی جدا شده از ماگما هستند.

بحث و بررسی

Pendahl و Frietsch (۱۹۹۵) روی کانسارهای آهن تیپ کایرونا، Tallarico و همکاران (۲۰۰۵) روی کانسنگ مگنتیتی ذخایر آهن گرمابی، Niranen و همکاران (۲۰۰۵) روی کانسنگ‌های آهن اسکارنی ناحیه می‌سی فنلاند و Oksuz و Koc (۲۰۰۹) روی کانسارهای آهن رسوبی بررسی‌های دقیق انجام داده‌اند. در شکل‌های ۱۶-A تا ۱۶-D، داده‌های پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب در این کانسارها و ذخیره چاه پلنگ آورده شده‌اند:

کانسنگ چاه‌پلنگ به چشم می‌خورد و تفاوت‌هایی (مانند: آنومالی منفی Eu و روند کاهشی با شیب کم) نیز دارند. شیب کم در این نمودار مربوط به جدایش کم میان LREE و HREE است. تنها شباهت چاه‌پلنگ و کانسارهای اسکارن، همپوشانی یا به گفته دیگر، دامنه مقداری REE هاست.

آهن اسکارنی الگوهای کمابیش متغیری نشان می‌دهند؛ اما از دیدگاه غنی‌شدگی LREE و تهی‌شدگی از HREE همانند کانسارهای با خاستگاه ماگمایی هستند (Niranan *et al.*, 2005). همان‌گونه که در شکل ۱۶-C دیده می‌شود، شباهت کمی میان الگوی REE این کانسار با



شکل ۱۶- مقایسه الگوی پراکندگی REE بهنجار شده به ترکیب کندریت در کانسنگ آهن چاه‌پلنگ با: (A) کانسارهای آهن رسوبی (Oksuz and Niranan, 2009)؛ (B) کانسنگ مگنتیتی ذخایر آهن گرمابی (Tallarico *et al.*, 2005)؛ (C) کانسنگ‌های آهن اسکارنی ناحیه می‌سی فنلاند (Niranan *et al.*, 2005)؛ (D) کانسارهای آهن تیپ کایرونا (Frietsch and Pendahl, 1995)

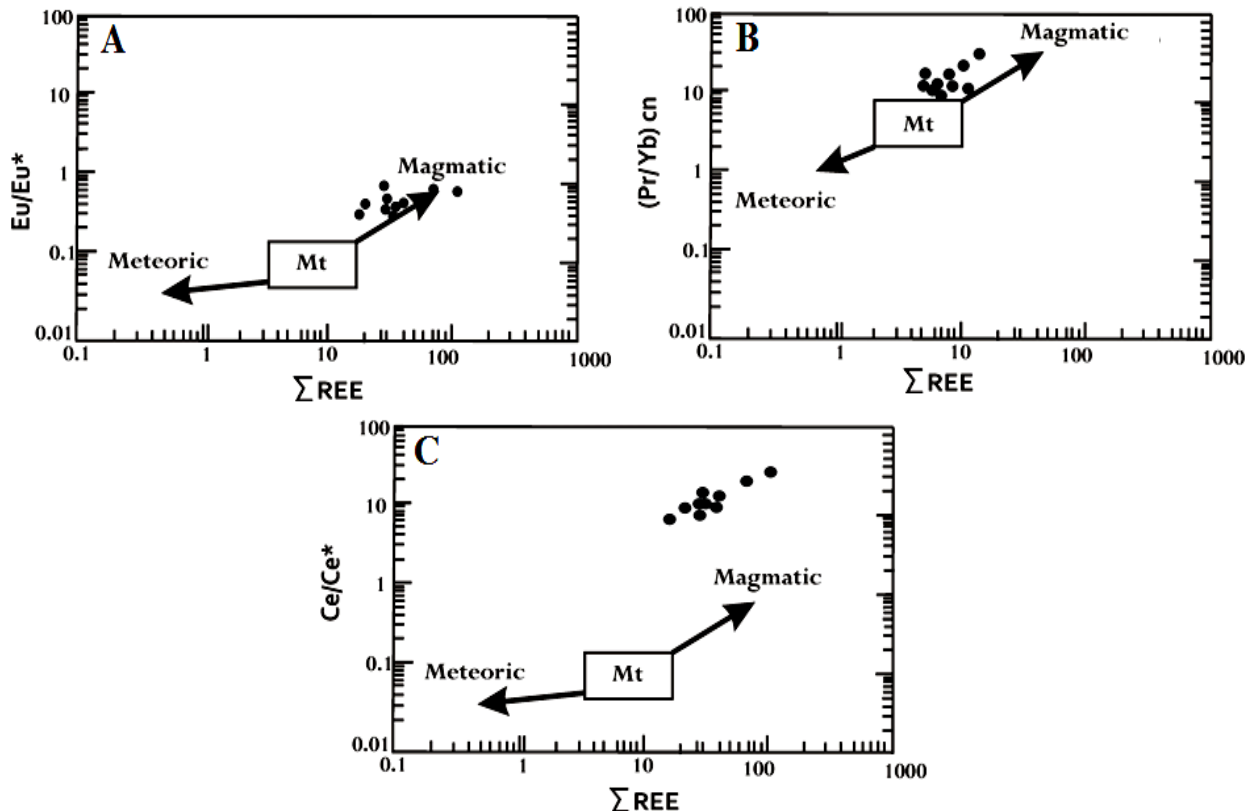
آهن تیپ کایرونا، مقدار REE کمابیش کم (ppm < ۱۰۰) است. در این تیپ کانسارها، نسبت LREE/HREE تفکیک مشخصی دارد و میزان تفکیک در LREE نسبت به HREE بالاست. در کانسنگ چاه‌پلنگ همانند کانسارهای تیپ کایرونا غنی‌شدگی از عنصرهای LREE به خوبی دیده می‌شود و نمودار روند

الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب کانسارهای آهن تیپ کایرونا و کانسنگ چاه‌پلنگ برای مقایسه با هم در شکل ۱۶-D آورده شده است. Frietsch and Pendahl (۱۹۹۵) توزیع و پراکندگی REE مگنتیت در کانسارهای آهن آپاتیت‌دار شمال سوئد را با هم مقایسه کردند و نشان دادند مگنتیت در کانسارهای

شبهات‌هایی نیز دیده می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که روندی کاهشی در الگوی پراکندگی REE این کانسارها دیده می‌شود. این ویژگی نشان‌دهنده نقش محلول‌های گرمایی در همه این کانسارهاست.

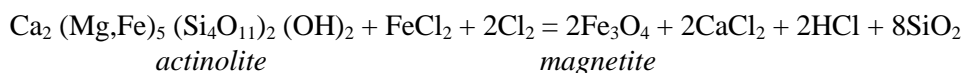
Kato (۱۹۹۹) بررسی‌هایی روی چهار کانسار ژاپن انجام داده است و برپایه سه پارامتر Eu/Eu^* ، Ce/Ce^* و $(Pr/Yb)_{cn}$ در برابر مجموع REE‌های کانسنگ، پیشنهاد کرده است که سیال‌های کانه‌زا یا خاستگاه جوی داشته‌اند یا ماگمایی بوده‌اند. برپایه بررسی‌های این پژوهشگر، این سه پارامتر برای آهن چاه پلنگ نیز به دست آورده و در برابر مجموع عنصرهای REE رسم شدند (شکل ۱۷). برپایه این شکل، بیشتر سیال‌های کانه‌زا، سیال‌های گرمایی برخاسته از ماگما بوده‌اند و سیال‌های جوی نقش بسیار کمی در کانه‌زایی آهن داشته‌اند.

کاهشی مشخصی را نشان می‌دهد. آنومالی منفی Gd در کانسنگ مگنتیت تیپ کایرونا از تفاوت‌های مربوط به الگوهای REE این گروه از کانسارها با الگوی REE کانسنگ چاه پلنگ است؛ زیرا در نمونه‌های چاه پلنگ این آنومالی دیده نمی‌شود. افزون‌براین، مقدار میانگین مجموع عنصرهای خاکی کمیاب سنگین از تفاوت‌های دیگر ذخیره چاه پلنگ با این گروه از کانسارهاست. این مقدار میانگین در کانسنگ چاه پلنگ برابر ۶ ppm است که از مجموع عنصرهای خاکی کمیاب در کانسارهای تیپ کایرونا کمتر است. همان‌گونه که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، دامنه مقداری HREE در این کانسارها گسترده است؛ اما در چاه پلنگ دامنه عددی کمی دارد. برپایه آنچه گفته شد، میان الگوی پراکندگی REE در منطقه چاه پلنگ و کانسارهای اسکارنی، گرمایی و کایرونا افزون‌بر برخی تفاوت‌ها،



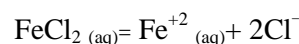
شکل ۱۷- نمودارهای نشان‌دهنده نوع سیال‌های مؤثر در کانه‌زایی با خاستگاه جوی و ماگمایی (Kato, 1999)

داغ (دمای بیشتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد) و احیایی است (Sverjensky, 1984). از آنجایی که آنومالی Eu در کانسنگ آهن مثبت است، پس دمای سیال نخستین سازنده آهن از ۲۵۰ درجه سانتیگراد بیشتر و اسیدیته آن بالا بوده است؛ از این رو، آهن را به صورت فرو و توسط کمپلکس‌های کلریدی انتقال داده است. به دنبال نفوذ این سیال درون شکستگی‌ها و فضاهای تهی سنگ میزبان که در پی فرایندهای زمین‌ساختی در منطقه روی داده است، این سیال اسیدی با سیالی چه‌بسا جوی، با pH بالا و فوگاسیته اکسیژن بالا آمیخته شده و pH بالای سیال و دمای آن کاهش یافته و شرایط برای ته‌نشست اکسیدهای آهن در منطقه فراهم شده است. لیگندهای کلریدی آهن در واکنش‌های فراوانی شرکت می‌کنند و ته‌نشست اکسیدهای آهن را در پی دارند. واکنش زیر یکی از این واکنش‌هاست (Luo *et al.*, 2015):



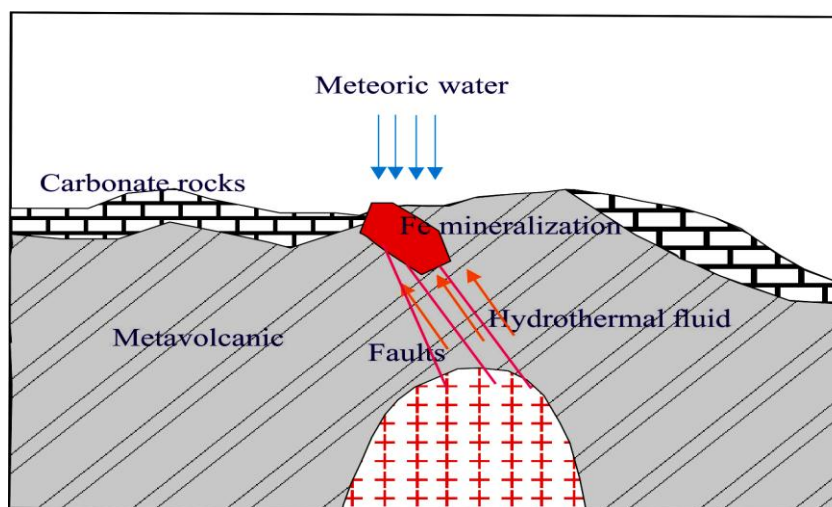
پیدایش شکستگی‌ها و گسل‌ها در سنگ میزبان ماده معدنی) ته‌نشست آهن را به دنبال داشته است. در شکل ۱۸، الگوی شماتیک چگونگی پیدایش رخدادهای آهن چاه‌پلنگ پیشنهاد شده است.

بیشترین انتقال آهن در محلول‌های آبکی و از درون پوسته زمین به صورت آهن فرو یا دو ظرفیتی (Fe^{+2}) روی می‌دهد. در دماها و درجه شوری‌های بالا، آهن فرو با لیگندهای کلریدی کمپلکس‌های پایدار (FeCl و FeCl_2) را می‌سازد و مسئول انتقال آهن است؛ اما با کاهش دما این کمپلکس پایدار خود را از دست می‌دهد (Robb, 2009):



بر پایه بررسی‌های انجام‌شده در شرایط حاکم بر رخساره شیست‌سبز تا آمفیبولیت، کمپلکس‌های کلریدی بهترین حمل‌کننده برای فلزهای پایه به‌شمار می‌روند. همان‌گونه که در بخش زمین‌شیمی عنصرهای خاکی کمیاب گفته شد، نمونه‌های کانسنگ آهن از LREE در برابر HREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند و لیگندهای کلریدی حمل‌کننده بهتری برای عنصرهای LREE هستند. آنومالی مثبت Eu مرتبط با سیال‌های

پس در رخدادهای آهن چاه‌پلنگ انتقال آهن در سیال‌های گرمایی به صورت کمپلکس‌های کلریدی روی داده است و عوامل گوناگونی (مانند: کاهش درجه دما، آمیختگی سیال‌ها با یکدیگر، افزایش نفوذپذیری و



شکل ۱۸- الگوی شماتیک چگونگی پیدایش رخدادهای آهن چاه‌پلنگ

نتیجه‌گیری

رخداد آهن چاه‌پلنگ در جنوب‌خاوری انارک دربردارندهٔ مگنتیت و هماتیت با مقدار کمی گوتیت است که به‌صورت پراکنده در سنگ میزبان و گاه عدسی‌های کوچک در منطقه رخنمون دارند. پیریت تنها کانی سولفیدی در منطقه است که به مقدار بسیار کم دیده می‌شود. بافت‌های پراکنده، توده‌ای، خوردگی، برشی، جانیشینی و شبکه‌ای از مهم‌ترین بافت‌های دیده‌شده هستند. سنگ میزبان کانسنگ سنگ‌های ولکانیکی دگرگون‌شده (متاندزیت و متابازالت) با سن پالئوزویک است. دگرسانی‌های سیلیسی و پروپلیتیک از مهم‌ترین دگرسانی‌های همراه با ذخیره هستند. بررسی دامنهٔ الگوی پراکندگی عنصرهای REE و نسبت‌های به دست آمده برای این عنصرها، همانندی این ذخیره با کانسارهای تیپ گرمابی را نشان می‌دهد. وجود سنگ‌های آذرین در محدوده معدنی نشان‌دهندهٔ وجود یک سیستم ماگمایی بزرگ‌تر در منطقه است که با کانه‌زایی آهن ارتباط دارد. عنصر آهن از یک تودهٔ آذرین به‌همراه سیال‌های جداشده از آن در راستای گسل‌ها به سوی بخش‌های کم فشارتر نزدیک سطح زمین حرکت کرده و به‌صورت

کمپلکس‌های پیچیده مختلف با لیگاندهای گوناگون در محلول جابجا شده است. به‌دنبال آمیختگی سیال‌های گرمابی و جوی ته‌نشست مگنتیت روی داده است. کاهش قدرت انحلال سیال گرمابی پدیدآمده در پی واکنش با سنگ‌های کربناته دولومیتی منطقه، افزایش فوگاسیته CO_2 و کاهش فعالیت H_2O را به دنبال داشته و به شکسته‌شدن کمپلکس‌های حمل‌کننده آهن انجامیده است. این فرایند در سیستم‌های ژرف که نسبت سیال به سنگ کم است و لیگاندهای کلریدی در سیال گرمابی فراوان هستند، مگنتیت را پدید می‌آورد. در شرایط سطحی، کاهش درجهٔ دما و افزایش pH در پی آمیختگی با آب جوی، حالت اکسیداسیون در سیال گرمابی را افزایش می‌دهند و هماتیت را در بخش‌های با ژرفای کمتر ذخیرهٔ چاه‌پلنگ پدید می‌آورند. این پدیده با دگرسانی پروپلیتیک (کلریست و اپیدوت) و سرانجام، سیلیسی‌شدن همراه است. بافت‌های توده‌ای و پراکنده در کانسنگ نشان‌دهندهٔ ته‌نشست از محلول نخستین و بافت‌های جانیشینی نشان‌دهندهٔ تأثیر محلول‌های ثانویه بر این کانسنگ هستند که سرانجام ته‌نشست گوتیت را به دنبال داشته‌اند.

منابع

- Afzali, S., Nezafati, N. and Ghaderi, M. (2017) Fluid inclusion and stable isotope study of the Gazestan magnetite-apatite deposit, Central Iran. *Quaternary Journal of Geosciences* 26(101): 35-44 (in Persian).
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. and Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Cambridge University Press, Geological Magazine* 1- 34.
- Aghanabati, A. (2004) *Iran Geology. Geological survey of Iran, Tehran, Iran* (in Persian).
- Arian Zamin (2012) *Geological report of Chahpalang deposit, Yazd province.*
- Atapour, H. and Aftabi, A. (2017) The possible synglaciogenic Ediacaran hematitic banded iron salt formation (BISF) at Hormuz Island, southern Iran: Implications for a new style of exhalative hydrothermal iron-salt system. *Ore Geology Reviews* 89: 70- 95.

- Atapour, H. and Aftabi, A. (2019) Comment on “Two-tiered magmatic-hydrothermal and skarn origin of magnetite from Gol-e-Gohar iron ore deposit of SE Iran: In situ LA-ICP-MS analyses” by Mirzaei et al. (2018): (*Ore geology Reviews*, 102, 639–653), *Geology*, DOI:10.1016/j.oregeorev.2019.102942.
- Bagheri, S. (2007) The exotic Paleo- tethys terrane in Central Iran: new geological data from Anarak, Jandaq and Posht- e- Badam areas. Ph.D. Thesis, Faculty of Geosciences and Environment, University of Leusanne, Switzerland.
- Bayat, F. and Torabi, G. (2012) Petrographic study of metabasites in the South of Arusan (NE Isfahan province). *Journal of Economic Geology* 2: 271- 284 (in Persian).
- Bao, Z., Zhao, Z., Guha, J., Williams-Jones, A. E. (2004) HFSE, REE and PGE geochemistry of three sedimentary rock- hosted disseminated gold deposits in southwestern Guizhou Province, China. *Geochemical Journal* 38: 363- 381.
- Barati, M. (2008) A comparative study on the formation of iron ore deposits in parts of Hamedan, Kermanshah and Kurdistan provinces. Ph.D. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).
- Barker, D. S. (1995) Crystallization and alteration of quartz monzonite, Iron Spring mining district, Utah, relation to associated iron deposits. *Economic Geology* 90(8): 2197–2217.
- Barret, T. J., Fralick, P. W. and Jarvis, I. (1988) Rare earth element geochemistry of some Archean iron formations North of Lake Superior, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences* 25(4): 570- 580.
- Behzadi, M. (2006) Mineralogy, geochemistry and genesis Northern Anomaly iron deposit located in Bafq- Yazd area. Ph.D. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (in Persian).
- Bonyadi, Z., Davidson, G. J., Mehrabi, B., Meffre, S. and Ghazban, F. (2011). Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se–Chahun iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Iran: insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology* 281(3-4): 253- 269.
- Boomeri, M. (2013) Rare Earth Minerals in Esfordi Magnetite- Apatite ore Deposit, Bafq District. *Geosciences* 22(85): 71-82 (in Persian).
- Boynton, W. V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry* (Ed. Henderson, P) 63- 114. Elsevier, California.
- Cullers, R. L. and Graf, J. L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks ore petrogenesis. In: *Rare earth element geochemistry* (Ed. Henderson, P) 275–316. Elsevier, Amsterdam.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Ausman, J. (1992) *An Introduction to the Rock forming Minerals*. Longman Scientific and tectonical, New York, US.
- Evans, A. M. (1987) *An Introduction to ore Geology*. Blackwell scientific publications, Oxford, London, Edinburgh.
- Frietsch, R. and Pendahl, J. A. (1995) Rare earth elements in apatite and magnetite in kiruna- type iron ores and some other iron types. *Ore Geology Reviews* 9: 489- 510.
- Fryer, B. J. (1977) Rare earth evidence in iron- formations for changing Precambrian oxidation states. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 41(3): 361- 367.
- Fusswinkel, T., Wagner, T., Wenzel, T., Wälle, M. and Lorenz, J. (2014) Red bed and basement sourced fluids recorded in hydrothermal Mn- Fe- As veins, Sailauf (Germany): a LA- ICPMS fluid inclusion study. *Chemical Geology* 363: 22- 39.

- Ghaderi, M., Rastad, E. and Rashidnejad, N. (2015) W (Cu- Au) mineralization of Southern Chahpalang: mineralogy, structure and texture, Geochemistry and isotopic data. *Journal of Earth Science* 95: 271-286.
- Ghorbani, M. (2002) Introduction to Iran Geology, Ministry of Industries and Mines, National Geoscience Database of Iran (Report No. 2). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Ghurchi Ruki, M., Karimpour, M. and Ebrahimi, K. (2010) Identification of advanced argillic and argillic alteration using SWIR bands in the Halkabad area. First Iranian Economic Geology Conference, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian).
- Guilbert, J. M. and Park, C. F. (1977) The geology of ore deposits. Waveland Press, New York, US.
- Heidarian, H., Alirezaei, S. and Lentz, D. R. (2017) Chadormalu Kiruna- type magnetite- apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. *Ore Geology Reviews* 83: 43- 62.
- Helvacı, C. (1984) Apatite- rich iron deposits of the Avnik (Bingol) region, Souteastern Turkey. *Economic Geology* 79(2): 345- 371.
- Jahangiri, H. and Mansuri, E. (2007) Report on Sn and W exploration in the South of Chupanan. Geological survey of Iran, Tehran, Iran.
- Jiang, S. Y., Zhao, H. X., Chen, T. Y., Yang, T., Yang, J. H., and Ling H. F. (2007) Trace and rare earth element geochemistry of phosphate nodules from the Lower Cambrian black shale sequence in the Mufu Mountain of Nanjing Jiangsu Province, China. *Chemical Geology* 244: 584- 604.
- Kamali, M. R., Parham, S. and Fayazi, F. (2012) Microfacies Analysis, Sedimentary Environments and Diagenesis of the upper Carbonates of the Dalan Formation in the Persian Gulf, Iran. *Scientific Quaternary Journal of Geosciences* 22(86): 203- 212 (in Persian).
- Karegaran Bafghi, F. (2001) Study of phosphate zones in Choghart iron deposit and their possible relations with phosphate zones of Esfordi deposit. MSc thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Persian).
- Kato, Y. (1999) Rare Earth Elements as an Indicator to Origins of skarn deposits: Examples of the amioka Zn- Pb and Yoshiwara- Sannotake Cu (- Fe) deposits in Japan. *Resource Geology* 49: 183- 198.
- Krauskopf, K. P. and Bird, D. K. (1976) Introduction to geochemistry. McGraw Hill, New York, US.
- Lottermoser, B. G. (1992) Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews* 7(1): 25-41.
- Luo, G., Zhang, Z., Du, Y., Pang, Z., Zhang, Y. and Jiang, Y. (2015) Origin and evolution of ore- forming fluids in the Hemushan magnetite-apatite deposit, Anhui Province, Eastern China, and their metallogenic significance. *Journal of Asian Earth Sciences* 113: 1100- 1116.
- Marschik, R. and Fontbote, L. (2001) The Candelaria- Punta Del Cobre iron oxide Cu- Au (- Zn- Ag) deposits. *Economic Geology* 96(8): 1799-1826.
- Morris, R. C. (1980) A texture and mineralogy study of the relationship of iron ore to BIF in the Hamersley Iron Province of Australia. *Economic Geology* 75: 184- 209.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Rashidnejad- Omran, N. and Daliran, F. (2009) Geochemistry and origin of apatite- bearing iron oxide deposit of Sorkhe Dizaj, SE Zanjan. *Economic Geology* 1(1): 19- 46.
- Naslund, H. R., Aguirre, R., Dobbs, F. M., Henriquez, F. J. and Nyström, J. O. (2000) The origin, emplacement, and eruption of ore mag mas, IX Congreso Geológico Chileno. *Sociedad geológica de Chile* 2: 135-139.

- Niranan, T., Manttari, I., Poutiainen, M., Oliver, N. and Miller, J. A. (2005) Genesis of Palaeoproterozoic iron skarns in the Misi region, northern Finland. *Mineralium Deposita* 40(2): 192- 217.
- Ohmoto, H. (2003) Nonredox transformations of magnetite- hematite in hydrothermal systems. *Economic Geology* 98(1): 157- 161.
- Okrusch, M., Lorenz, J. and Weyer, S. (2007) The genesis of sulfide assemblages in the former Wilhelmine mine, Spessart, Bavaria, Germany. *The Canadian Mineralogist* 45: 723–750.
- Oksuz, N. and Koc, S. (2009) Examination of Sarikaya (Yozgat- Turkey) iron mineralization with rare earth element (REE) method. *Journal of Rare Earths* 28(1): 143- 149.
- Rajabzadeh, M. A., Hoseini, K. and Moosavinasab, Z. (2014) Mineralogical and geochemical studies on apatites and phosphate host rocks of Esfordi deposit, Yazd province, to determine the origin and geological setting of the apatite. *Journal of Economic Geology* 6(2): 331- 353 (in Persian).
- Rajabzadeh, M. A. and Rasti, S. (2017) Investigation on mineralogy, geochemistry and fluid inclusions of the Goushti hydrothermal magnetite deposit, Fars Province, SW Iran: A comparison with IOCGs. *Ore Geology Reviews* 82: 93- 107.
- Ramdohr, P. (1980) The ore minerals and their intergrowths. Akademie-Verlag, Berlin Germany.
- Robb, L. (2009) Introduction to ore- forming processes. Blackwell Publishing, Malden, Maryland, US.
- Schwertmann, U. (1988) Occurrence and formation of iron oxides in various pedo environments: in iron in Soils and Clay minerals. Springer Netherlands, 217: 267- 308.
- Sepehrirad, R. (2000) Economic geology of northern anomaly iron deposit, Choghart. MSc thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Persian).
- Sepidbar, F., Mirnejad, H., Li, J. W., Wei, C., George, L. L. and Burlinson, K. (2017) Mineral geochemistry of the Sangan skarn deposit, NE Iran: Implication for the evolution of hydrothermal fluid. *Chemie der Erde- Geochemistry* 77(3): 399- 419.
- Sheibe, M., Esmaily, D., Nedelec, A., Bouchez, J. L. and Kananian, A. (2010) Geochemistry and petrology of garnet- bearing S-type Shirk uh granite, Southwest Yazd, Central Iran. *Island Arc* 19: 292- 312.
- Spangenberg, J. E., Lavric, J. V., Alcalá, C., Gosar, M., Dold, B. and Pfeifer, H. P. (1999) Inorganic and organic geochemical patterns of waste material from the Idrija mercury mine (Slovenia): tracers of natural and anthropogenic chemicals. 5th Biennial SGA Meeting and 10th Quadrennial IAGOD Symposium, London, England.
- Stöcklin, J. (1977) Structural correlation of the Apline range between Iran and central Asia. *Memoire Hors- Serve No. 8 dela Societe Geologique de France* 8: 33- 353.
- Sverjensky, D. A. (1984) Europium equilibrium in aqueous solution. *Earth and Planetary Sciences Letters* 67: 70- 78.
- Tabatabaiemanesh, M., Mirlohi, A. and Movahedi, M. (2011) petrography, Sanandaj- Sirjan zone, petrology, granitoid, Sanandaj, Sirjan zone, Ochestan, Markazi province. *Iranian Journal of Petrology* 7(2): 51- 74 (in Persian).
- Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., Groves, D. I., Kositcin, N., McNaughton, N. H., Fletcher, I. R. and Rego, J. L. (2005) Geology and SHRIMP U- Pb geochronology of the Igarape Bahia deposit Carajas copper- gold belt, Brazil, An Archean (2/75Ga) example of iron- oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology* 100(1): 7- 28.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Publishing, Oxford, UK.

- Technoexport (1982) Report on detailed geological prospecting in Anarak area (Central Iran) (Chah Palang locality).
- Wendt, J., Kaufmann, B., Belka, Z., Farsan, N. and Karimi- Bavandpur, A. R. (2005) Devonian- Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran, Part II. Northern and Central Iran. *Acta Geologica Polonica* 55: 31- 97.
- Whitney, D. L. and Evans, B. V. (2010) Abbreviations for names of rock- forming minerals. *American Mineralogist* 95(1): 185–187.
- Wilmsen, M., Fursich, F., Seyed- Emami, K., Majidifard, M. R. and Taheri, J. (2009) The Cimmerian Orogeny in the northern Iran: tectonicstratigraphicevidence from the foreland. *Terra Nova* 21: 211- 218.
- Zanchi, A., Zanchetta, S., Garzanti, E., Balini, M., Berra, F., Mattei, M. and Muttoni, G. (2009) The Cimmerian evolution of the Nakhlak- Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin. *Geological Society of London* 312: 261- 286.